

Omfillingsmasser for røygater i bratt terreng

Tor Oxhøvd Svalesen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: november 2015

Hovedveileder: Leif Lia, IVM

Medveileder: Gudmund Reidar Eiksund, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGÅVE

Student: TOR OXHOVD SVALESEN

Tittel: OMFYLLINGSMASSAR FOR RØYRGATER I BRATT
TERRENG

1 BAKGRUNN

Bruk av nedgrovne røyr gater som vassveg til kraftverk er i dag nesten einerådande for bygging av vassveg til småkraftverk. Dei fleste småkraftverka har heilt eller delvis vassvegen som nedgrove røyr gate, og løysingane utviklar seg vidare. I perioden 2001 - 2014 er det fullført 361 nye småkraftverk (> 1 MW) i Noreg. I samband med at 406 allereie har konsesjon (men ikkje bygd) og at 488 står att for konsesjonshandsaming i NVE, vil det truleg bli bygd 50 – 100 småkraftverk kvart år framover. Det er viktig for sikkerheten at slike røyr gater byggast rett, samstundes som det er viktig for samfunnet å utnytte materialar og metodar optimalt for å unngå unødige løysingar.

Sidan 2010, då NVE starta å føre eit register for brot og/eller alvorlege hendingar på røyr gater, er det registrert 23 brot/skader på røyr gater for småkraftverk.

2 GJELDANDE KUNNSKAP

Prosjekt- og masteroppgåver utført i 2011 - 2015 viser varierende praksis på både prosjektering og legging av nedgrovne røyr. Det finnast også eksempel på at legging av røyr skjer i terreng som ligg utanfor generelle retningslinjer for hellingforhold m.m. I prinsipp finnast det tre måtar å hindre nedgrovne røyr å gli i bratt terreng:

- Tilstreккеleg friksjon mellom røyrvegg og omfyllingsmasse
- Strekkfaste skøytear og –røyr ut frå forankringskloss
- Røyr som stukar mot kvarandre i muffene ned mot forankringskloss

I tillegg registrerast det også at krav til omfyllingsmasse ikkje fyllast i heile periferien på røyret. Det er ikkje påvist at dette har negativ effekt for stabilitet av røyr gata. Forsøk gjort i laboratorium og i felt i 2011 – 2013 viser korleis ulike forhold med innbygging, omfyllingsmasse, komprimering, helling m.m. påverkar tilgjengeleg friksjon mellom røyr og grøft. Forsøka viser interessante samanhengar, men materialet er å rekne som foreløpig, sidan talet på forsøk er nokså lite. Det er heller ikkje funnen systematiske feil i grunnlaget for bygging av slike røyr gater. For å møte auka krav til låge kostnader for småkraftverk, er det viktig å kunne utnytte stadeigene massar og varierende byggemetodar for røyr gata, framleis med eit tilstrekkeleg sikkerhetsnivå.

2 HOVUDPUNKT I OPPGÅVA

Arbeidet med masteroppgåva vil innehalde følgjande hovudpunkt:

1. Innhenting av grunnlagsmateriale for røyr gater som viser variasjon i byggemetode, omfyllingsmasse og røyrtypar.
2. Opplisting og gjennomgang ulike omfyllingsmassar brukt for røyr gater.
3. Testing av eigenskapar mot røyr i ulike omfyllingsmassar.
4. Gjennomføring av laboratorieforsøk med ulike omfyllingsmassar
5. Vurdering av kostnadsreduksjon s.f.a. ulike omfyllingsmassar
6. Utarbeiding av forslag til testprogram for fullskala testing situasjonen i 3. og 4.
7. Forslag til eventuell revisjon av retningslinje for bygging av nedgrovne røyr
8. Dokumentasjon og rapportering

Innhaldet i masteroppgåva vil bli tilpassa undervegs, men alle avvik i høve til oppgåveteksten skal grunnjevast nøye.

3 RETTLEIING, DATA OG INFORMASJON

Formell rettleiar vil vere Leif Lia på NTNU og medrettleiarar Prof. Arne Aalberg (K) og Prof. Gudmund Eiksund (Geot.). Andre kontaktpersonar og samarbeidspartnerar i prosjektet vil vere:

Dag Norum og Dag Bachke, NVE Damsikkerhetsseksjonen
Bjarte Skår, Brødrene Dahl AS (leverandør)

Diskusjon med, og bidrag frå, kollegaer og medarbeidarar med NTNU, SINTEF, NVE, leverandørar, rådgivarar, entreprenørar og kraftselskap vert tilrådd. Bidrag som går inn i oppgåva skal alltid refererast til på rett vis.

4 RAPPORTFORMAT, REFERANSAR OG ERKLÆRING

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osb. 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 i pdf-format i DAIM og trykkast i tre eksemplar som sendast direkte frå trykkeri til faglærer/institutt.

Samandraget skal ikkje gå over meir enn 450 ord og skal vere eigna for elektronisk rapportering.

Masteroppgåva skal ikkje leverast seinare enn onsdag 10. november 2015.

Trondheim, 24. juni 2015

Leif Lia
Professor

Forord

Denne rapporten er undertegnedes avsluttende arbeid på det femårige masterstudiet bygg- og miljøteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven er utført sommeren og høsten 2015 i et samarbeid mellom institutt for vann- og miljøteknik (IVM), institutt for konstruksjonsteknikk (KT) og det nederlandske selskapet Penstock BV (PS).

Etter hvert som strømprisene har falt i 2014 og 2015 har byggingen av småkraftverk bremsa kraftig opp. Målet med oppgaven har vært å komme fram til nye metoder å bygge rørgater på som utnytter byggematerialene på en enda bedre måte enn i dag, og dermed legge et grunnlaget for å realisere prosjekt som pr i dag ikke er lønnsomme.

Mange personer har bidratt inn i dette. En spesielt stor takk rettes til hovedveileder professor Leif Lia (IVM) for stort engasjement og vilje til å bruke søndagskvelder, ettermiddager, lunsjpauser på jakt og vanlig kontortid på konstruktive innspill og diskutering av de resultatene som er kommet fram under arbeidet. Det har vært til stor inspirasjon. En stor takk også til førsteamanuensis Arne Aalberg (KT) for hjelp til å lande en modell for forsøkene med polyuretan og ikke minst takk til Guy Harris (PS) som har vært en svært interessant diskusjonspartner og samarbeidspartner i gjennomføringen av torsjonsforsøkene.

Jeg vil takke Bjarte Skår i Brødrene Dahl for tre interessante dager på deres kontor på Dale i Sunnfjord og for tilrettelegging for friksjonsforsøkene som ble kjørt der. Tusen takk til teamet i Norsk Grønnkraft for dagen i Oslo med diskusjon av byggemetoder på rørgater og deling av erfaringer. En stor takk til labteknikker ved materialteknisk laboratorium Gøran Loraås for bygging av modellen til torsjonsforsøkene.

Jeg ønsker også å takke de som har bidratt med hjelp, informasjon og nyttige diskusjoner i dette arbeidet. Det gjelder Dag Backe i NVE, Edvin Bakken i AEB AS og utbyggerne av Sundli kraftverk i Orkdal for at jeg fikk bli med på NVEs tilsyn under bygginga av rørgata til kraftverket og for mye skriftlig informasjon og nyttig stoff til oppgava. Tusen takk til Clemens Kraft AS også for omvisning på byggeplass ved Væla kraftverk i Tydal. Tusen takk til Jon Olav Volden i Norsk Grønnkraft for tilrettelegging for besøkene ved Nybuelve og Tverråne kraftverk.

I arbeidet med kartlegging ar årsak til rørbrudd har Dag Kåre Lindland og Grete Holm Midtømme i NVE vært til stor hjelp.

Narvik 19.11.2015

Tor Oxhøvd Svalesen

Sammendrag

Dagens praksis ved bygging av nedgravde rørgater på småkraftverk, er en økende bruk av masser med til dels høyt finstoffinnhold som omfylling rundt rørene. I bære- og støttesonen brukes det fortsatt pukk, men i den øvre omfyllingssonen brukes det masser i spennet 0-22 mm og 0-60 mm. Det virker ikke å være krav til største andel 0-stoff i disse massene.

Ved studering av leggeanvisninger fra de største produsentene på glassfiber, duktile støpejern og polyetylen-rør, går det fram at produsentene tillater bruk av finkornige masser med redusert krav til bæreevne i forhold til krav for fundamentsonen, i varierende del av tverrsnittet. Duktile støpejernsrør er den rørtypen som har lavest krav til omfyllingsmassene.

Studerte prøver av omfyllingsmasse tatt fra rørgater under bygging og stedlige masser, viser at velgraderte masser har bedre friksjonsegenskaper enn pukk til å forankre rørene på friksjon. Målt friksjonskoeffisient ligger i størrelsesorden 0,50 til 0,58 for lett pakke jordprøver mot røroverflate. De stedlige masseprøvene viser i 3 av 4 tilfeller minst like gode eller bedre egenskaper på friksjonskoeffisient og kornfordeling enn de massene som brukes i dag.

Basert på dette er det rom for økt bruk av stedlige masser til omfylling av rørgater.

Det er gjort forsøk med bruk av Polyuretan-skum som omfyllingsmateriale rundt nedgravde rørgater. Disse forsøkene er gjort som enkle verifikasjonsforsøk i laboratoriet av grenseflaten PU-skum-jord. Resultatene fra forsøkene er at PU som er minst like god eller bedre enn dagens praksis med bruk av pukk og sorterte masser. Forsøkene indikerer skjærkapasitet i grenseflaten jord-PU-skum i str. orden 3 ganger bedre enn grenseflaten jord-GRP, ved begynnende bevegelse/rotasjon

Kompresjonstester viser at 2/3 av trykkstyrken er mobilisert etter bare 2% tøyning. Det betyr at en relativt liten deformasjon setter opp nok motstand til å bære rør og vannet inni.

Summary

Current practice in the construction of buried penstocks in small hydro, is a growing use of soils with fine content as a part of the backfill around the penstock. In the carrying zone it is still normal to use crushed stone and coarse gravel, but in the upper zone around the pipe, masses of gravel and moraine in the range 0-22 mm and 0-60 mm, are more and more common to use.

The installation instructions from the largest manufacturers of fiberglass, ductile cast iron and polyethylene tubes does not say that the filling-material should be just crushed stones or coarse gravel. It is allowed to use fine-grained soils with reduced carrying capacity in a varying portion of the cross section. Ductile cast-iron pipes is the kind of penstock that has the lowest requirements to the filling materials.

Studied samples of backfill taken from penstocks under construction and native soil along the trench, shows that well-graded masses have better friction-capacity than gravel to anchor the pipes. Measured coefficient of friction is in the range of 0.50 to 0.58 for light compressed soil samples towards the penstock surface. The native soil samples indicates in 3 of 4 cases friction coefficient and grain size distribution of the same quality or better than the materials used today.

Based on this, there is room for increased use of native soil as backfill around the penstocks.

Use of polyurethane foam as backfill material around buried penstocks have been tested. These tests were done as simple verification tests in the laboratory of the interface PU foam soil. The results from the experiments is that PU is at least as good or better, than the current practice of using crushed rock and collated masses. The experiments indicate shear strength at the interface soil-PU-foam in a magnitude of 3 times better than the interface soil-GRP, at the initial movement / rotation

Compression tests show that 2/3 of the compressive strength is mobilized by only 2% strain. This means that a relatively small deformation sets up enough resistance to carry the pipe and the water inside.

Innhold

Innhold	1
Figurliste.....	3
Tabelliste	7
1 Innledning.....	9
1.1 Bakgrunn	9
1.2 Formål med oppgava.....	10
1.3 Metode.....	10
1.4 Begrensninger og omfang	10
2 Gjeldende regler og kunnskap om emnet.....	11
2.1 Tidligere oppgaver på emnet.....	11
2.2 Damsikkerhetsforskriften og NVEs retningslinje	11
3 Byggemetoder for rørgater	15
3.1 Rørmaterialer.....	15
3.2 Omfyllingsmasser brukt på rørgater.....	23
3.3 Komprimering	25
3.4 Studier av anlegg under bygging.....	27
3.5 Diskusjon.....	43
4 Friksjonsforsøk.....	47
4.1 Motivasjon.....	47
4.2 Friksjon og friksjonsfaktor	47
4.3 Materialer	48
4.4 Metode og oppsett	56
4.5 Resultat.....	60
4.6 Diskusjon.....	64
5 Forøk med polyuretan – skum.....	67
5.1 Bakgrunn	67
5.2 Gjeldende regler og standarder	68
5.3 Leggemetode for rør med omfylling av PU-skum	70
5.4 Materialelegenskaper	72
5.5 Måling av trykkfasthet og strekkfasthet i PU-materialet	77
.....	79
5.6 Diskusjon av materialparametre.....	82

5.7 Metode, oppsett, utstyr og fremgangsmåte for forsøk	86
5.8 Resultater torsjonsforsøk.....	97
5.9 Diskusjon og feilkilder	105
6 Konklusjon	109
Kilder.....	113

Figurliste

Figur 1: Forankring av rør; (a) oppstrøms forankring, (b) nedstrøms forankring, (c) forankring fra friksjon (Fra Bergsaker og Bårgard, 2012)	15
Figur 2: To typer grøftetverrsnitt for omfylling av GRP-rør. (Flowtite)	17
Figur 3: Snitt av muffe, viser pakning, prinsipp for låsespor til venstre (Brødrene Dahl)	17
Figur 4: Venstre: GRP-rør med ekstra tykk ende og freset spor til låsing, øverst h.: nærbilde av låsespor, nede h.: muffe med utfresa spor til låsering og hull for entring av ring inn i sporet (Brødrene Dahl).....	18
Figur 5: Prinsipp skjøtemufer duktile rør, øverst standard, midten strekkfast, nederst forsterka strekkfast (PAM)	20
Figur 6: Eksempel på bruk av strekkfaste bend , bilde fra katalog til rørleverandøren Duktus	21
Figur 7: Oversikt over sikkerhetsfaktor, trykklasser og SDR-benevning (Hallingplast).....	21
Figur 8:Hydraulisk rigg for buttsveising av PE-rør (Hordaland Rørteknikk AS).....	22
Figur 9: Fleksible montasje-muligheter med PE-rør (Hordaland Rørteknikk AS)	23
Figur 10: Observerte prinsipper for omfylling; venstre: pukkk nesten helt opp til topp rør, midten: pukkk opp til 50-60% av diameter, høyre: pukkk kun i bæresonen.	24
Figur 11: Materialprøver hentet fra rørgate på kraftverk under bygging. Fra venstre: Støttefylling Væla, bæresone Væla, bæresone Sundli, omfylling Sundli.	24
Figur 12:Utlekking av strømkabel og trekkerør. Overfylling med 0-22 mm bærelag etter komprimering før fylling av stedlige masser. Foto: Tor Oxhøvd Svalesen	31
Figur 13: Typisk grøftetverrsnitt for GRP- prosjektet med 8-16 mm pukkk 2/3 opp på røret. Foto: Tor Oxhøvd Svalesen.....	31
Figur 14: Bekkekryssing Sundli Kraftverk, foto: Tor Oxhøvd Svalesen	32
Figur 15: 110 mm drenerør som går fullt etter bekkekryssing. Foto: Tor Oxhøvd Svalesen...	32
Figur 16: Støpt såle ved åpen kryssing av bekk over rørgate. Foto: Tor Oxhøvd Svalesen	32
Figur 17: Bend B7. Legg merke til størrelsen på plata i forhold til selve klossen rundt røret. Foto: Tor Oxhøvd Svalesen.....	33
Figur 18: Armering av bend B7 (30°). Inn mot røret er det lagt en duk som skal hindre at betongen hefter direkte i GRP-materialet. Foto: Tor Oxhøvd Svalesen	33
Figur 3-19: Utsnitt fra lengdeprofil på rørgate, Tverråga kraftverk (Norsk Grønnkraft AS) ..	36
Figur 20: Grus/Morenerygger i grøftetraseen ca 200 meter opp for Tverråne kraftverk. Personen holder en tommestokk på 2,0 m. Masseprøve M1 er hentet like ved. (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen)	36
Figur 21: Tverråne kraftverk, nedfylt rørgate ca 200 meter opp for kraftstasjonen. Masseprøve M2 er tatt i dette området. (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen).....	37
Figur 22: Eksempel på grøfteprofil ca 350 meter oppfor Tverråne kraftverk.: Humuslag på toppen, noe morenejord i varierende tykkelse og til dels kort vei ned på fjell. Ved god planlegging er det mulighet for å ta vare på morenelaget før boring og sprening. (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen)	37
Figur 23: Tverråne kraftverk ca 200 meter opp for kraftstasjonen, nedfylt rørgate, tilsynelatende med pukkk rundt hele eller store deler av røret. (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen) .	38
Figur 3-24: Typisk grøftetverrsnitt for rørgate av PE og duktilt støpejern, (Norsk Grønnkraft AS)	38

Figur 25: Legging av rørgate Tverråga, overgang fra strekkfaste til ikke strekkfaste (blå rør). (Foto: Norsk Grønnkraft AS)	39
Figur 26: Prosjektert løsning for bekkekryssing Tverråga og Nybuelve kraftverk. (Norsk Grønnkraft AS).....	39
Figur 27: Nybuelve kraftverk, legging av duktile støpejernsrør. Masseprøvene M3 og M7 er tatt fra omfyllingsmassene på bildet (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen).....	42
Figur 28: Nybuelve kraftverk, oversiktsbilder bygging av rørgate. Entreprenør i gang med bildetaking og egenkontroll til venstre, graving av grøft til høyre.. (Foto Tor Oxhøvd Svalesen)	44
Figur 29: Rørgate Fall kraftverk med betongklosser på hver retningsendring. Bruk av strekkfaste skjøte burde vært vurdert. (Foto: Arne Hamarsland, NVE).....	45
Figur 4-30: Eksempel på kraft-forskyvningsdiagram (Bossel og Haugen 2013).....	48
Figur 31: Masseprøver henta fra Nybuelve kraftverk	50
Figur 32: Område stedlig masseprøve fra Tverråga er tatt.....	50
Figur 33: De fem masseprøvene brukt på GRP og duktile rør. Øverst fra venstre: M7, M1, og M6. Nederst fra venstre: M5 og M4.....	50
Figur 34: Masseprøve M1	51
Figur 35: Masseprøve M5	51
Figur 36: Hentested M4, Ekle Grustak AS, Trondheim.....	52
Figur 37: Masseprøve M4	52
Figur 38: Kornfordelingskrurve samleplott prøver av finkornige masser	53
Figur 39: Kornfordelingskurve, samleplott masser fra bæresonen	54
Figur 40: Duktilt støpejernsrør med sink/bitumen ytterkappe	55
Figur 41: GRP rør.....	55
Figur 42: Prinsipptegning for forsøkene	56
Figur 43: Loggeutstyret, lastcelle og kalibrering med 1,0 og 2,0 kg lodd	57
Figur 44: sylinder og kasse montert på sink/bitumenrør.....	57
Figur 45: Sylinder og kasse montert på sementmørtelbetong-rør	57
Figur 46: t.v forsøk er gjennomført, bilde tatt før demontering. Legg merke til lodd og det tynne laget med finmasser som ligger igjen på røret. t.h:sylinder og kasse montert på GRP-rør.	58
Figur 47: Største statiske friksjonsfaktor for forsøk 1 i hver serie.....	61
Figur 48: Største statiske friksjonsfaktor for forsøk 2 i hver serie.....	61
Figur 49: Største statiske friksjonsfaktor for forsøk 3 i hver serie.....	61
Figur 50: Største statiske friksjonsfaktor, median av målt verdi for forsøk 1 til 3 i hver serie	62
Figur 51: Største statiske friksjonsfaktor for forsøk 1 i hver serie.....	62
Figur 52: Største statiske friksjonsfaktor for forsøk 2 i hver serie.....	63
Figur 53: Største statiske friksjonsfaktor for forsøk 3 i hver serie.....	63
Figur 54: Største statiske friksjonsfaktor for median av målt verdi for forsøk 1 til 3 i hver serie	63
Figur 55: Kasse mot rør med sementmørtelbetong	64
Figur 56: Oppløft av kasse på grunn av momentkrefter fre trekkraften i sylindere.....	65
Figur 57: Påføring av PU, forsøk Mjøndalen. (Foto: Penstock BV).....	70
Figur 58: Installasjon av PU rundt rør. Øvre bilde viser maskin som holder rør i riktig posisjon og 50% oppfylling med PU. Nedre viser påføring av øvre lag PU. Fylling mot grøftevegg (Penstock BV).....	70

Figur 59: Bruk av forskaling til å forme PU-tverrsnittet (Penstock BV)	71
Figur 60: Polyol (lys) og isocyanat (mørk) klar til å veies opp før blanding	72
Figur 61: Målt stress-strain på homogent PU med tetthet 52 kg/m ³ (O.Buzzi et al. 2009)	74
Figur 62: Flytespenning for PU i forhold til densitet. Hc er homogent PU-skum. (O Buzzi et al. 2009).....	74
Figur 63: Kornfordelingskurve 4-8 mm knust pukkk brukt i forsøk 4-7	75
Figur 64:4-8 mm knust pukkk brukt i forsøk 4-7, kornform.....	76
Figur 65: Terning 100 x 100 mm	77
Figur 66: Prøvestykker til strekkforsøk.....	78
Figur 67:Kjøring av terning 100 x 100 mm i prøvemaskin på materialteknisk laboratorium NTNU.....	78
Figur 68: Kjøring av strekkprøve i prøvemaskin på materialteknisk laboratorium NTNU	79
Figur 69: Spenning-tøyningsdiagram for de to terningene	80
Figur 70: Sammenpressing av terninger, form på materialet underveis	80
Figur 71: Bruddform på strekk-prøver	81
Figur 72: Spenning-tøyningsdiagram for måling av strekkfasthet PU-skum.....	82
Figur 73: Grenseflater og materialer, prisnippskisse for bruk av PU-skum rundt rør	86
Figur 74: Oversiktsbilde fra forsøk utført i Mjøndalen. På grøfta til venstre ble det ikke fylt over masser før påføring av trykk med jekk. På grøfta til venstre ble det lagt på ca 0,6 m overdekning. (Foto: Penstock BV).....	87
Figur 75: Ved skjærbrudd må kornene gli over hverandre og påføre spenning er på nabokorn. Fra Emdal (2009)	89
Figur 76: Beregning av vertikale spenninger i jordmaterialer (Bergsaker og Bårgaard, 2012).....	90
Figur 77: Stålrør med vinger som støpes inn i PU	91
Figur 78: Montering av PU-sylinder og omfylling med masser. Ureagert PU synes som gult flytende materiale på kjernen.	93
Figur 79: innfesting av lastcelle og manuell jekk i samme plate som betongringen er sveiset fast til.....	93
Figur 80: Oversikt over forsøksoppsett. Jekken festes i øyebolten på armen som påfører moment på vingene på sylinderen nede i betongringen. Når armen beveges vil prøvestykket rotere. Fastsveising av betongringen synes nede til høyre.	94
Figur 81: Oppsett for GRP-rør i samme testrigg.....	96
Figur 82: Resultat prøve 6 og prøve 7	97
Figur 83: Resultat prøve 1, opptredende skjærkraft.....	98
Figur 84: Angivelse av bruddsted prøve 1	98
Figur 85: Resultat prøve 2, opptredende skjærkraft.....	99
Figur 86: Ekspansjonen i PU-skummet presser opp omfyllingsmassene i forsøk 2	99
Figur 87: Resultat prøve 3, opptredende skjærkraft.....	100
Figur 88: Anvisning av bevegelsen i massene ved brudd forsøk 3	100
Figur 89: Resultat prøve 4, opptredende skjærkraft.....	101
Figur 90: Bruddanvisning i massene forsøk 4. Fig. til høyre: eksempel på ujevnheter i overflaten av sylinderen	101
Figur 91:Resultat prøve 5, opptredende skjærkraft.....	102
Figur 92: Bruddanvisning forsøk 5	102
Figur 93: Resultat prøve 6, opptredende skjærkraft.....	103
Figur 94: Bruddanvisning forsøk 6	103

Figur 95:Resultat prøve 7 GRP, opptredende skjærkraft	104
Figur 96: Bruddanvisning forsøk 7 GRP.....	104
Figur 97: Opptredende skjærkraft ved rotering av prøvestykke, forsøk 6 og 7	105

Tabelliste

Tabell 1: Stivhetskategorier for omfyllingsmasse rundt GRP-rør fra Flowtite.....	16
Tabell 2: Største kornstørrelse tillatt brukt i omfyllingsmassen inn mot røret (Flowtite).....	17
Tabell 3: Største nominelle kornstørrelse for trykkrør av PVC og PE, (NPG Norge, 2011)...	22
Tabell 4: Type masse brukt i bæresone og støttefylling på de fire studerte rørgatene. M(nr) referer til masseprøve nr for friksjonsforsøk.....	24
Tabell 5: Rørgate Tverråne kraftverk, trykklasser og rørtyper	34
Tabell 6: Nybuelve kraftverk, trykkklasse, dimensjon og lengde.....	40
Tabell 7: Nybuelve kraftverk, beregning av trykkklasse på rørgate	41
Tabell 8: Beregnet spenning i rørveggen PE-rør Nybuelve kraftverk	41
Tabell 9: Nybuelve kraftverk, rørgate, beregning av nødvendig overdekning basert på trykk og avvinkling.....	42
Tabell 10: Masseprøver til bruk i friksjonsforsøk.....	49
Tabell 11: Oversikt over gjennomførte forøksserier med jordmaterialer	59
Tabell 12: Største målte statiske friksjonsfaktor målt på DN500 PN6 GRP	60
Tabell 13: Største målte statiske friksjonsfaktor på DN500 duktile støpejernsrør m/ sink/bitumen ytterkappe. M6 = 8-16 knust pukk, M2 = stedlig Tverråne, M4 = Naturmasser Ekle, M5 = svart, sandig jord, M7 = 16-22 delvis knust naturpukk Tverråne	62
Tabell 14: Materialeegenskaper PU målt i tidligere arbeid	73
Tabell 15: Data på prøvestykker brukt i strekk- og trykkforsøk	77
Tabell 16:Resultater fra trykkforsøk	79
Tabell 17:Resultat måling av strekkfasthet	81
Tabell 18: Oversikt over friksjonsforsøkene utført med PU-skum	96

1 Innledning

Denne masteroppgava viderefører arbeidet som tidligere er gjort i et samarbeidsprosjekt mellom Norges Vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Institutt for vann- og miljøteknikk ved NTNU om nedgravde rørgater. Samarbeidsprosjektet startet i 2011 og det er tilsammen skrevet fire prosjektoppgaver og to masteroppgaver om emnet. Denne oppgaven blir den tredje masteroppgaven om emnet. Prosjektets langsiktige mål er å øke kunnskapen og forståelsen av hvilke krefter som virker på nedgravde rørgater for kraftverk, for å ha et best mulig grunnlag for riktig prosjektering og bygging.

1.1 Bakgrunn

Siden 2001 er det fullført over 300 nye småkraftverk i Norge. Pr 3. kvartal 2015 ligger det 516 nye søknader om konsesjon til behandling hos NVE og det er gitt 426 konsesjoner der bygging ikke er satt i gang. (NVE [1], 2015) På grunn av reglene om grønne sertifikat som pr i dag sier at kraftverket må være satt i drift senest 31.12.2020 for å få bli med i ordningen, var det fram til sommeren 2014 ventet et stort press på utbygging av småkraft fram til og med 2020. Basert på antall søknader til behandling og allerede gitte konsesjoner, var det forventet bygging av 50 -150 småkraftverk pr år i denne perioda. Det siste året har fallet i kraftprisene og prisene på elsertifikater ført til en kraftig oppbremsing i bransjen. De tre første kvartalene i 2015 er det ferdigstilt og satt i drift bare 20 småkraftverk med en samlet produksjon på 515 GWh. Det gir en gjennomsnittlig produksjon på 27,5 GWh pr kraftverk. Utbyggingstakten ligger altså langt under det som må til for å realisere de tillatelsene som er gitt før 2020 og det ser ut til å være de større småkraftverkene som prioriteres. Antall småkraftverk under bygging ved utgangen av tredje kvartal 2015 er 42.

Behovet for mer solid finansiering har økt i takt med at prisene har falt. Det har skjedd strukturendringer i bransjen det siste året der minst tre store selskap; Blåfall, Norsk Grønnkraft og Småkraft har solgt hele eller deler av sine portefølger med prosjekter og/eller utbygde kraftverk. Lønnsomheten har falt og mange anlegg som ble vurdert som lønnsomme å bygge for et par år tilbake vurderes nå som for dyre til å settes i gang.

Rørgatene utgjør ofte nær halvparten av utbyggingskostnadene på et småkraftverk. De fleste av konsesjonssøknadene som ligger til behandling og som har fått konsesjon er planlagt med nedgravd rørgate. Ved å forske på materialer og metoder for å redusere tid og ressursbruk på bygging av rørgater kan flere av de verkene som pr nå vurderes som for dyre å bygge, kanskje realiseres allikevel, selv med det nye prisbildet bransjen forventer.

Det er viktig for sikkerheten at rørgater bygges riktig. Samtidig er det viktig for samfunnet å utnytte materialer og metoder optimalt for å unngå unødige dyre løsninger. Svalesen (2015) studerte innrapporterte rørbrudd for perioden 2009 til 2014 og fant at det ikke er grunn til å tro at det er feil i beregningsmetodikken for beregning av stabilitet som er årsaken til de rørbruddene som har oppstått. Gjennomgående var det noe materialfeil, manglende kontroll i byggeperioden og andre tilfeldig feil på grunn av vær og uheldige omstendigheter. Det ble også observert at friksjonsegenskapene som legges til grunn for omfyllingsmassene ved beregning av glidestabilitet, baserte seg på til dels svært konservative verdier. Det betyr at anleggene har til dels betydelig mer innbygget sikkerhet enn det som tilsynelatende oppgis.

Det gir også grunnlag for å undersøke om det brukes mere ressurser enn nødvendig på å oppnå en tilfredsstillende grad av sikkerhet for rørgatene som bygges.

De tidligere prosjekt- og masteroppgavene har i laboratoriet og felt sett på hvordan ulike forhold som innbygging, omfyllingsmasse, komprimering og helning påvirker tilgjengelig friksjon mellom rør og grøft og hvordan dette stemmer med gjeldene praksis for teoretisk beregning av sikkerhetsfaktor. Foreløpige resultat indikerer at sikkerhetsfaktoren mot glidning i realiteten er høyere enn beregna for slakt terreng og lavere enn beregningsmodellene tilsier når vinkelen nærmer seg friksjonsvinkelen til omfyllingsmassene.

1.2 Formål med oppgava

Lavere lønnsomhet i bransjen og det som er observert i tidligere oppgaver og arbeid legger grunnlaget for problemstillingene i denne oppgaven. Denne oppgava skal se på hvordan rørlegging utføres i praksis, kartlegge metoder for installasjon og gjennomføre tester av aktuelle materialer som brukes eller kan brukes til omfylling rundt rørgata. Det er grunn til å tro at leggemetoden og omfyllingsmassene varierer noe fra anlegg til anlegg og det er derfor interessant å prøve å beskrive dette.

Institutt for vann- og miljøteknikk har i samarbeid med institutt for konstruksjonsteknikk, blitt engasjert til å gjøre enkle verifikasjonsforsøk for å finne ut om skum av polyuretan kan brukes som omfyllingsmateriale på rørgater. Oppdraget gjennomføres innenfor ramma av denne masteroppgaven og innebærer materialforsøk på materialteknisk laboratorium ved NTNU.

1.3 Metode

Datagrunnlag og materialprøver samles ved å besøke kraftverk under bygging og intervjuer bransjeaktører. De tidligere oppgavene om emnet danner det teoretiske grunnlaget for vurdering av de dataene som samles inn.

Materialenes friksjonsegenskaper mot de rørtypene som stort sett brukes testes i forsøk. Hvert forsøk med en type masse mot en type rør gjentas tre ganger for å redusere tilfeldige feil i oppsettet. De tre identiske forsøkene utgjør en serie. Det lages en siktekurve på hvert materiale for å kunne sammenligne materialene med hverandre.

Verifikasjonsforsøkene med Polyuretan som omfylling gjøres som modellforsøk i laboratoriet. Hvilke forsøk som gjennomføres baserer seg på en systemanalyse der den antatt mest interessante grenseflaten for systemet rør-skum-jord velges ut.

1.4 Begrensninger og omfang

Denne oppgava er begrensa til 30 studiepoeng ved NTNU. Det vil si en arbeidsbelastning tilsvarende ett semester. Forsøkene med bruk av polyuretan-skum kom til under veis etter at arbeidet med oppgaven hadde startet. Det førte til nedprioritering av to av problemstillingene i oppgaveteksten:

- pkt 5 vurdering av kostnadsreduksjon s.f.a. ulike omfyllingsmasser
- pkt 6 forslag til testprogram for fullskala testing av friksjonsegenskaper for ulike omfyllingsmasser mot rør

2 Gjeldende regler og kunnskap om emnet

2.1 Tidligere oppgaver på emnet

Arbeidet med denne rapporten bygger på tidligere master- og prosjektoppgaver utført på emnet. Disse finnes ved institutt for vann- og miljøteknikk ved NTNU. Dette er:

2.1.1 Prosjektoppgavene

- «Nedgravde rørgater i bratt terreng» ved Håkon Bergsaker, 2011
- «Rørgater i bratt terreng» ved Erlend Hillestad Bårgard, 2011
- «Stabilitet av nedgravde rørgater» ved Eirik Bossel og Mats Breien Haugen, 2012

2.1.2 Masteroppgavene

- «Forankring av rørgater i bratt terreng» ved Håkon Bergsaker og Erlend H. Bårgard, 2012

Oppgaven undersøker beregningsmodellene for glide stabilitet, motstand mot oppløft og global knekking, som brukes både i vannkraftbransjen og andre fagområder. Dette er gjort gjennom modellering, fysiske modellforsøk i laboratorier ved NTNU og fullskala uttrekksforsøk i felt med DN 500 PN6 GRP-rør på 6,0 meter.

- «Forankring av rørgater i bratt terreng» ved Eirik Bossel og Mats Breien Haugen, 2013

Viderefører uttrekks-forsøka i felt til Bergsaker og Bårgard (2012) og presenterer fem ulike beregningsmodeller for å beregne stabiliteten til ei rørgate forankra på friksjon. Beregningsmodellene evalueres med modellforsøk i laboratorium og feltforsøk. I laboratoriet testes det DN 100 PN 16 og DN 300 PN 16 GRP rør med lengde hhv 3,5 og 3,0 meter. I laboratorietestene brukes det 4-8 mm pukkk. I felt testes det DN 500 PN 6 GRP-rør horisontalt og med helning. Testene måler friksjonsmotstanden mot å trekke rørene ut av massene som er fylt rundt.

Masteroppgavene er tilgjengelige på NTUS side for digital arkivering og innlevering av masteroppgaver. Bruk søkeordet «rørgater» i søkefeltet.

2.2 Damsikkerhetsforskriften og NVEs retningslinje

NVE har i «Retningslinjer nr 1/2011» gitt «retningslinjer for stenge- og tappeorganer, rør og tverrslagsporter». Disse utdyper bestemmelsene som er gitt i forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften) §§ 5-14 og 5-15, og gir uttrykk for den praksis NVE vil følge i sin saksbehandling.

§ 5-14 handler om stenge og tappeorganer og gjengis ikke her. § 5-15 handler om rør og tverrslagsporter. Det mest relevante avsnittet for arbeidet med denne rapporten er § 5-15 a) andre ledd:

«Nedgravde rør skal plasseres i stabile masser. Røret legges slik at det ikke oppstår skadelige setninger, aksial eller sideveis forskyvning. Omfylling skal ikke skade eller deformere røret. Skadelig erosjon som kan oppstå i masser på utsiden av røret skal forebygges.»

§5-15 andre og tredje ledd sier:

«Dimensjonerende lastvirkninger skal klarlegges ved beregninger utført etter anerkjente metoder og baseres på realistiske forutsetninger om konstruksjonens egenskaper og oppførsel.

Ved dimensjonering skal konstruksjonen kontrolleres i følgende grensetilstander:

- *Bruddgrensetilstand*
- *Ulykkestilstand*
- *Utmattelsestilstand*
- *Bruddgrensetilstand*

Relevante krav som gjelder omfyllingen rundt nedgravde rør ihht NVEs retningslinje for stenge- og tappeorganer, rør og tappeorganer, er følgende (NVE, 2011):

- Frittliggende og nedgravde rør med skjøter/koblinger og fundamenter, skal representere et **entydig statisk system** der det er definert hvor røret fastholdes og hvor det kan forskyve seg pga trykk- og temperaturendringer.
- Alle rør skal kontrolleres for **karakteristisk innvendig overtrykk** langs hele rørtraseen. Karakteristisk overtrykk tilsvarer høyeste statiske trykk tillagt maksimal svingegrense eller maksimalt dynamisk trykk (trykkstøt) beregnet for ulike snitt langs røret. Tilhørende minimumstrykk skal normalt ingen steder være under atmosfæretrykket, men et begrenset undertrykk kan aksepteres dersom tilfredsstillende sikkerhet kan dokumenteres.
- Uten grundig dokumenterte beregninger skal ikke **dynamisk vanntrykk** settes lavere enn 30% av statisk vanntrykk. I konsekvensklasse 2 og høyere skal det fremlegges dynamiske beregninger av trykkstøtet langs rørtraseen. Beregninga skal ta hensyn til turbinens eller pumpas karakteristikk med hensyn til trykk og vannføring som funksjon av tid. For rør i konsekvensklasse 1 kan det antas lineært avtagende trykkstigning fra kraftstasjon til nærmeste fri vannspeil eller til vesentlig økt strømningsstverrsnitt. Da gjelder imidlertid at rørene skal dimensjoneres med en sikkerhetsfaktor tilsvarende for samme rørtype i konsekvensklasse 2.
- **Sikkerhet for nedgravde rør mot glidning ivaretas av friksjonen mellom rør og omfyllingsmasser.** Nedgravde rør som ikke ligger stabilt med omfyllingsmasser alene må sikres med forankringsfundamenter For rørtraseer brattere enn 20(o) skal det utføres beregninger som viser hvordan stabiliteten blir ivaretatt. Det skal anvendes anerkjente beregningsmodeller ifm. stabilitetsanalysen.
- **Sikkerhet mot glidning i drenert grøft** skal i bruddgrensetilstand være **minst 1,5**. Sikkerheten mot glidning ved **vannfylt grøft** til topp rør skal være **minst 1,1**.

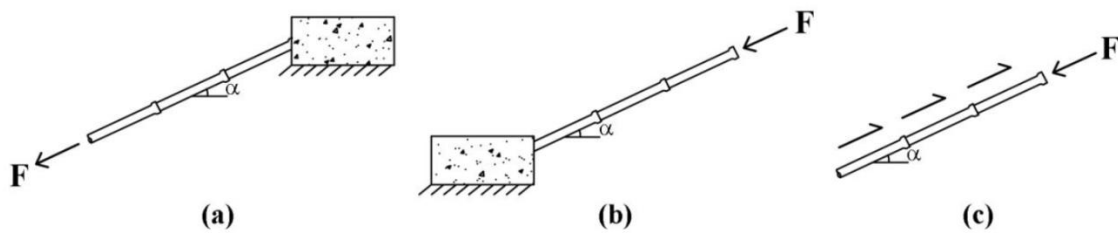
- Rørene monteres slik at de er sikret mot aksiell forskyvning og utknekking. Strekkfaste koblinger monteres ofte slik at det er strekk i rørstrengen etter montasje og før rørfylling.
- Bend og andre formstykker uten strekkfaste skjøter skal vanligvis stabiliseres ved hjelp av egenvekt, vannvekt og jordtrykk, eventuelt støpes inn.
- Ved horisontale og vertikale retningsendringer i rørtraseen oppstår det bendkrefter. Kravet er at røret skal ligge i ro uten deformasjoner. Uten strekkfaste skjøter skal det for sideveis- og vertikal kraft bare regnes med stabiliserende bidrag fra overdekningsmassen vertikalt over røret og maksimalt i en lengde på 1/3 av lengden på tilstøtende rør.
- Ved avvinkling tillates det ikke å regne passivt jordtrykk mellom rør og grøftevegg. Det skal brukes en **montasjeunøyaktighet på 0,5** i forbindelse med kontrollen.
- **Rørene legges slik at de er tilfredsstillende sikret mot aksial forskyvning, utknekking og utglidning.**
- Fundamentet i grøfta skal være stabilt og avrettet og det skal ikke forekomme oppstikkende steiner eller fjellknatter.
- De graderte omfyllingsmassene inn mot rørveggen skal ha en tykkelse på minst 0,3 m og innfylles slik at utvendig røroverflate eller korrosjonsbeskyttelse ikke skades.
- I fjellgrøft skal tykkelsen på grøftesålen være 0,3 meter mens sålen i løsmassegrøft skal være minst 0,2 meter.
- Grøftesåle og omfyllingsmasser skal komprimeres for at rør og rørfundamenter blir liggende stabilt uten fare for setninger eller uforutsigbare tilleggspåkjenninger.
- Geoteknisk tekstil legges i den grad det blir nødvendig for å beskytte omfyllingen mot finstoffinntrenging.
- Overdekningen skal være minst 0,8 meter og gå 1,5 ganger til hver side for røraksen i områder uten trafikklast.
- Nødvendige tiltak gjøres mot utgraving/utvasking av omfyllingsmassene både ved montasje og senere drift. Dette kan være drenasjerør, avskjærende grøfter, sperrer og lignende.
- Ved bygging og fornyelse av rørgater skal det utarbeides tekniske planer som sendes NVE til godkjenning før man får tillatelse til oppstart. Disse skal minimum inneholde:
 - Kart med inntegna rørtrase i horisontal og vertikalplanet
 - Plassering av bend, spesielle rørdeler, forankringer samt overgangen mellom ulike rørtyper, trykkklasser og rørdimensjoner
 - Dimensjonering av rør med tilhørende konstruksjonsdeler, inkl trykkstøtsberegninger

- Kontroll av sikkerheten mot glidning av nedgravde rør i trasé med helning større enn 20°
- Stabilitetsberegninger av betongfundamenter eller andre typer forankringer
- Kontroll av skråningsstabilitet der rør legges i bratt løsmasseterreng og ellers ved vanskelige grunnforhold
- Beskrivelse av hvordan rør skal legges relatert til stedlige forhold langs rørtraséen. Dette kan være viktig ved kontrollpunkter som kryssing av veg, jernbane, elv og bekkeløp og ved retningsendringer i vertikal- eller horisontalplanet.
- Drenering og bortledning av vann fra rørgrøft
- Plassering og beskrivelse av stengeanordning

3 Byggemetoder for rørgater

3.1 Rørmaterialer

Rørgater kan bygges og forankres etter de tre prinsippene vist i figur 1. Ikke alle typer rør kan brukes til de forskjellige prinsippene fordi de har ulike egenskaper til å tåle og overføre strekk- og trykk-krefter.



Figur 1: Forankring av rør; (a) oppstrøms forankring, (b) nedstrøms forankring, (c) forankring fra friksjon (Fra Bergsaker og Bårgard, 2012)

I dagens marked er det Glassfiberarmert Polyester (GRP), duktile støpejernsrør og Polyetylenrør (PE) som i hovedsak brukes ved bygging av nye, nedgravde rørgater. Stålrør kan også brukes.

3.1.1 Glassfiberarmert Polyester

Generelt

GRP (Glassfibre Reinforced Polyester) også kjent som GUP (Glassfiberarmert Umetta Polyester) i Norge tidligere, er en herdeplast med kryssbundet molekylær struktur. GRP kan ikke bli omforma etter at det har fått sin endelige form i motsetninger til termoplast som PE, PVC og PP. GRP blir i hovedsak bygd opp av polyester og armeres med glassfiber. Materialet er dermed korrosjonsfritt. Det finnes flere produsenter og hovedforskjellen mellom leverandørene er hvordan glassfibrene tilsettes i produksjonsprosessen og hvilken retning de har. Her er en kort oversikt:

Kontinuerlig vikleprosess

- Brukes av Flowtite (tidligere Vera Fabrikker i Sandefjord)
- utvendig påføring av polyester, sand og kontinuerlig glassfiber i tangensiell retning på røret og kutta glassfiber som gir styrke i aksial retning
- gode egenskaper på ringstivhet, mer begrenset strekkapasitet i aksial retning fordi hovedvekten av glassfibrene ligger i ringretningen.



Sentrifugal støping

- Brukes av Hobas og C-Tech
- Roterende form der polyester, sand/kalsium karbonat og kutta glassfiber blir tilført innvendig.
- Tilfeldig påføring av kutta fiber gir teoretisk lik styrke i alle retninger



Kryssvikling

- Brukes av Sarplast og Ameron
- Roterende kjerne med utvendig materialpåføring
- Består av polyester og kontinuerlig glassfiber lagt i kryss
- Brukes i industri, shipping og olje og gass, stor aksialstyrke



Bruksområde og krav til installasjon/omfylling

Glassfiber er normalt konkurransedyktig for trykk opp til 32 bar og leveres normalt i 6 eller 12 m lengder. (Brødrene Dahl [1]) Rør finnes i diametere fra 100 til 3000 mm for trykkklasser PN6 til PN16. PN 20 til PN 32 finnes i størrelsene 300 til 1400 mm. (Flowtite) Her følger krav til omfylling rundt rør fra Flowtite:

I installasjonsveiledningen skrives det «*Pipe zone backfill may be selected from the soil removed from the trench or may require special soils to be imported to the job site.*»

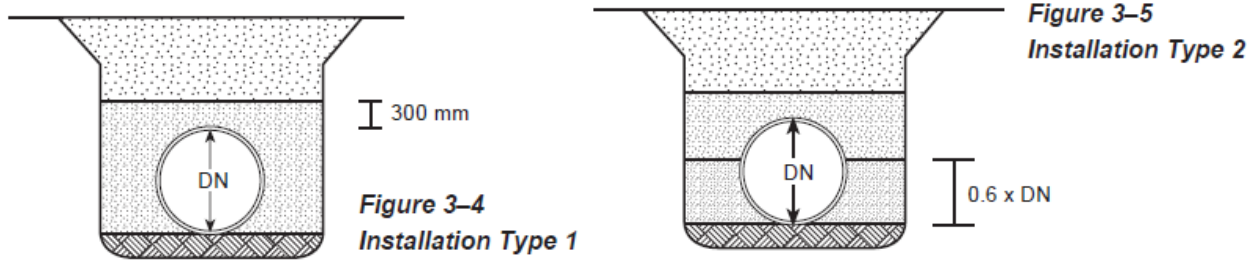
Flowtite opererer med fire stivehetskategorier for omfyllingsmassene:

Stivhets kategori	Bekrivelse
SC1	Knust stein, < 15% sand, max 25% passerer 9,5 mm sikt og maks 5% finesstoff ¹
SC2	Rene grovkornede jordarter med < 12% finstoff ¹
SC3	Rene, grovkornede masser med 12 % eller mer finstoff ¹ . Sandige eller grusige finkornige jordarter med < 70% finstoff ¹
SC4	Finkornede jordarter med mer enn 70% finstoff ¹

1)% finstoff er vektprosenten av jordpartikler som passerer en sikt med 0,076 mm åpning

Tabell 1: Stivhetskategorier for omfyllingsmasse rundt GRP-rør fra Flowtite

Figur 2 viser to typer grøftetverrsnitt avhengig av bruken av arealet over røret. Legg merke til at «rørsonen» defineres til 300 mm over topp rør. Kravene til omfyllingsmasse gjelder i rørsonen.



Figur 2: To typer grøftetverrsnitt for omfylling av GRP-rør. (Flowtite)

Type 2 tillater bruk av ulike masser over og under 60% høyde av nominell diameter, og brukes typisk for lavere trykk (<10 bar) med liten trafikkbelastning og begrensa krav til å håndtere undertrykk. Type 2 illustrer også godt at GRP-rør er helt avhengig av god nok støtte på sidene og nedre halvdel av røret for å hindre deformasjon av røret og ovalitet.

For rør fra 300 mm og oppover skal det brukes SC1 og SC2 i bære- og støttesonen opp til 0,6 x DN. Fra 0,6 x DN og opp til 300 mm over topp rør kan både SC3 og SC4 brukes. SC3 forutsettes komprimert til 85% Standard Proctor Density (SPD) og SC4 til 90% SPD. Avhengig av lasttilfelle for internt vakuum, trafikklast, hvilke type masser grøfta er gravd i og grunnvannstand, er det utarbeida tabeller for hvor stor total overdekning røret tåler og hvilke typer SC-klasse som kan benyttes.

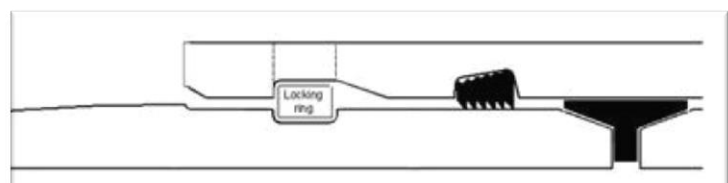
Av tabellene for installasjonstype 1 går det også fram at SC3 og SC4 kan brukes rundt hele røret i de tilfeller det er fordelaktige lastkombinasjoner og stabil masse i grøftebunn og vegger.

Det er egne krav til største kornstørrelse i rørsonen gitt i tabell 2:

DN	Største kornstørrelse [mm]
< 450	13
500 – 600	19
700 – 900	25
1000 – 1200	32
> 1300	40

Tabell 2: Største kornstørrelse tillatt brukt i omfyllingsmassen inn mot røret (Flowtite)

Metoder for sammenkobling og bend
GRP skjøtes ved å bruke muffe som rørendene tres inn i. Muffene inneholder pakninger som tetter mellom rørveggen og muffeveggen. Rørene skal ha en viss avstand inne i muffa til å vandre på i forbindelse med egenutvidelse pga endringer i temperatur.



Figur 3: Snitt av muffe, viser pakning, prinsipp for låsespor til venstre (Brødrene Dahl)

Det kan brukes en avvinkling i hver muffe på inntil 2 grader og det må beregnes at omfylling og overdekning tåler de utadretta kreftene som oppstår på grunn av trykk og avvinkling. På grunn av manglende evne til å tåle strekk ved bruk av strekkfaste skjøter, må alle retningsendringer større enn 2 grader normalt tas med bend. Disse må støpes inn med egne forankringsklosser som håndterer kreftene fra vinkelendringa og vanntrykket.

Nedgravde rør lagt i helning forankres ved at friksjonen mellom rør og jord hindrer røret fra å skli.

Det finnes en løsning for bruk av strekkfaste koblinger på GRP-rør. Denne innebærer at det er lagt på et ekstra lag med glassfiber i rørenden som det er fresa ut et spor i. Det finnes et tilsvarende spor på innsida av muffa som det tres inn en låsepinne som går rundt hele røret. Det er viktig å beregne rørets strekk og trykkapasitet i aksial retning dersom det planlegges med strekkfaste skjøter på GRP.



Figur 4: Venstre: GRP-rør med ekstra tykk ende og freset spor til låsing, øverst h.: nærbilde av låsespor, nede h.: muffe med utfresa spor til låsering og hull for entring av ring inn i sporet (Brødrene Dahl)

3.1.2 Duktile støpejernsrør

Generelt

Duktile støpejernsrør er sentrifugalstøpte rør av seigjern. Vanlig gråjern består av jern (Fe), karbon(C) og silisium (Si) og er et sprøtt materiale. Ved å tilsette 800-1000 g magnesium pr tonn til gråjernsmelta, blir materialet seigt, smidig og bøyelig. (PAM)

E-modul $1,7 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ og strekkfasthet 420 N/mm^2 .

Avhengig av bruksområde og valg omfyllingsmasser finnes det flere varianter av utvendig overflatebehandling. Fra rørprodusenten PAM (PAM,Sain-Gobian) oppgis disse å være:

- I. Sink og bitumen belegg, sorte rør. 200 g/m^2 sink + $70 \mu\text{m}$ bitumen
- II. Natural, blå rør, 400 g/m^2 sinkaluminium (85% sink + 15% aluminium) + $100 \mu\text{m}$ epoksybelegg
- III. Polyetylen, belegg av PE lagt over 200 g/m^2 sink. Veiduk klasse 5 kan brukes som ekstra beskyttelse av PE-kappa
- IV. ZMU, blå rør med 5 mm fiberarmert sementmørtelbetong lagt over 200 g/m^2 sink

Bruksområde og krav til installasjon/omfylling

Duktile støpejernsrør brukes stort sett på trykklassene PN32 og oppover, der terrenget tilsier at det er behov for strekkfaste egenskaper på rørgata eller der tilgjengelige omfyllingsmasser krever et mer robust rør enn GRP og PE. Rørene fås i dimensjoner fra DN100 til DN 2000 og i trykklasser opp til 100 bar. En utbygger oppgir at de vurderer duktile rør til å bli for tungt og dyrt fra ca DN 900 og oppover. Med en E-modul på $1,7 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ har rørene god ringstivhet og er mindre sårbare for manglende komprimering, manglende sidestøtte og setninger i fundamentet, enn andre typer rør.

Det skilles mellom rørgater med trafikklast og rørgater uten trafikklast/vannkraftanlegg. I det videre presenteres krav til omfyllingsmasser for rørgater uten trafikklast/vannkraftanlegg som gjelder for overflatebehandling I bitumen og II Natural.

«For rørgater i vannkraftanlegg i jomfruelig mark uten trafikklast, er kravene redusert. Dette gjelder grøftmasser, komprimering og overdekning. Stedlige morenemasser er godt anvendelig.»

Grøftebunnen skal være slik at rørene ikke ligger direkte på store steiner eller oppstikkende fjellpartier. Det er avgjørende for rørledningens levetid. I utgravd grøft er minste tykkelse på nedre fundament mot grøftebunn 150 mm. For sprengt grøft 300 mm.

Det skilles mellom nedre fundament, øvre fundament og omfyllingsmasser. Nedre fundament er mellom røret og grøftebunnen og kan bestå av stedlige masser som morenegrus med steinstørrelse opp til 60 mm. Komprimering anbefales, men kan vurderes ut fra de stedlige massene. Øvre fundament er massene mellom underkant rør og $\frac{1}{4}$ av rørets diameter. Samme masekrav som til nedre fundament. Komprimering kan gjøres med spade eller støvler.

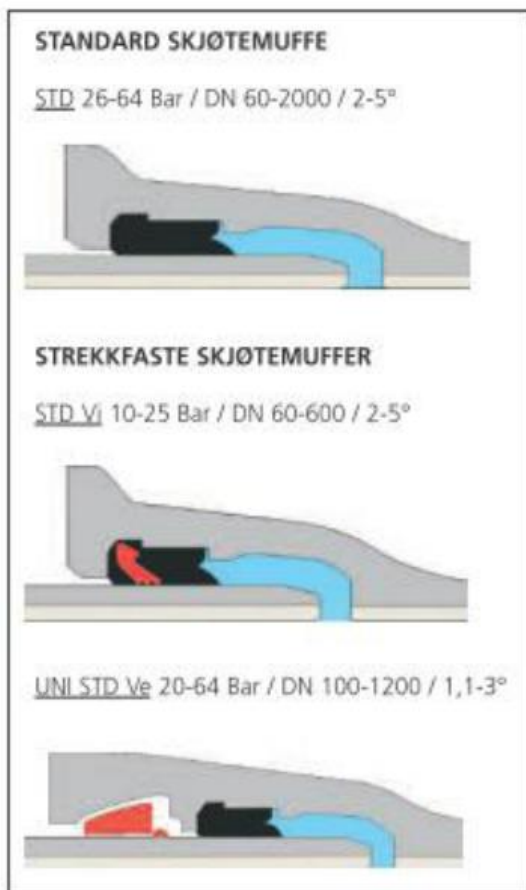
Hovedregel for omfyllingsmassene er at massene i kontakt med rørets overflate er av samme slag. Unngå felter med blanding av morenemasser, jord og leire i direkte kontakt med

røroverflaten. Omfyllinga bør gå minimum 300 mm over røret. Overdekning opp til 10 meter er vanligvis ikke noe problem. Det fremgår ikke direkte hva som er kravene til største steindiameter i omfyllingsmassene, men generelle krav for bruk i kommunaltekniske anlegg med trafikklast er 0-60 mm ved naturmaterialer og maks 32 mm kornstørrelse ved knuste materialer.

For rør med utvendig fiberarmert sementmørtelbetong står det i installasjonsveiledningen: « Som fyllmaterial kan praktisk talt alle former for utgravningsmaterialer brukes, selv sprengningsmaterialer med stein opptil 100 mm. Annen omfyllingsmasse er bare unntaksvis nødvendig.» (Buderus)

Metoder for sammenkobling og bend

De høye verdiene for flytegrense, E-modul og strekkfasthet tillater at rør og rørforbindelser tar opp store krefter. Dette utnyttes i strekkfaste skjøtemuffer. Eksempelvis kan en DN 300 skjøtemuffe utsettes for 34 tonn trekraft. (PAM)



Figur 5: Prinsipp skjøtemuffer duktile rør, øverst standard, midten strekkfast, nederst forsterka strekkfast (PAM)

Figur 5 viser prinsippene for skjøting av duktile støpejernsrør og deler. Øverste figur viser standard skjøtemuffe som brukes når det ikke er behov for strekkfaste egenskaper. Det vil si at rørene legges på samme måten som GRP-rør med at de fastholdes av friksjonen mellom jord og rør og har litt rom for å utvide seg pga temperatur i hver muffe. Tillatt avvinkling i hver muffe 2-5 grader.

Tegningen i midten viser en skjøtemuffe med strekkfaste egenskaper der det ligger gripehoder inne i pakningen som låser seg dersom røret trekkes ut igjen av muffen.

Behøves det større strekkfast kraft kan den nederste prinsippet benyttes, der røret som tres inn i muffa har en sveisevulst som låses av kiler som legges inn bak sveisevulsten og hindrer røret å gli ut igjen. Mekanismen i muffa er todelt: pakningen tetter for vannet og sveisevulsten gir strekkfasthet.

Som figurene viser er det en glippe mellom muffa og rørveggen. På grunn av temperaturutvidelse må rørgata ha mulighet til utvidelse uten at det oppstår trykkspenninger med påfølgende utknekkning.

Figur 6 er et bilde fra en rørkatalog til produsenten Duktus som viser muligheten for bruk av strekkfaste bend. Når trykket settes på holdes røret sammen av de strekkfaste skjøtene. Skulle dette vært bygd med GRP eller ikke strekkfaste skjøter måtte det ha blitt bygd fire betongklosser (eller en stor) for å holde røret sammen.



Figur 6: Eksempel på bruk av strekkfaste bend, bilde fra katalog til rørleverandøren Duktus

Med strekkfaste bend tas den utadretta krafta på grunn av avvinklinga opp av rørmaterialet i seg selv og har ikke behov for forankringsklosser av betong. Det er det samme prinsippet som brukes i vanlig rørlegging når et bend monteres på et rett rørstrekk: vannet trykker mot veggen i bendet tilsvarende det projiserte arealet av rørtverrsnittet og prøver å dra bendet med seg, men i og med bendet henger fast i det rette strekket tas kraften opp i skjøten mellom rett rør og bend og overføres til det rette strekket som strekkspenninger i rørveggen.

Katalogen til leverandøren Duktus viser at det finnes strekkfaste bend for 11, 22, 30 og 45 grader i dimensjonene DN 80 til DN 1000.

3.1.3 PE-rør

Generelt

Polyetylen-rør ekstruderes ut fra smeltet PE-granulat og finnes i mange forskjellige trykklasser og dimensjoner. Plastmaterialet har en densitet på $0,96 \text{ kg/m}^3$. Ved beskrivelse av trykkklasse brukes begrepet *SDR*, som er et dimensjonerende forholdstall mellom ytterdiameter D_y og veggtykkelse e gitt slik:

$$SDR = \frac{D_y}{e}$$

Avhengig av ønsket sikkerhetsfaktor på rørmaterialet kan trykklassene leses ut av fig. 7:

c:	SDR41	SDR33	SDR26	SDR21	SDR17	SDR13,6	SDR11	SDR9	SDR7,4
1,6	PN3,2	PN4	PN5	PN6,3	PN8	PN10	PN12,5	PN16	PN20
1,25	PN4	PN5	PN6,3	PN8	PN10	PN12,5	PN16	PN20	PN25
"c" = Sikkerhetsfaktor/Designfaktor				PN = Nominellt trykk / Pressure nominal					
SDR = Dimensjonerende forholdstall for "D _y " og "e". (D _y / SDR = e)									

Figur 7: Oversikt over sikkerhetsfaktor, trykklasser og SDR-benevning (Hallingplast)

For PE100 gjelder (ved +23 grader celsius):

- Langtids strekkfasthet 10 N/mm^2 (uten at røret deformeres)
- Kort tids strekkfasthet 20 N/mm^2 (for belastning i opptil 1 minutt)

Bruksområde og krav til installasjon/omfylling

PE-rør produseres i diametere opp til 2000 mm og kan brukes på relativt høye trykk. På grunn av at veggtykkelsen går til dels kraftig opp med økende trykklasser og diametere og at prisen

på PE er en tilnærma kilopris, er PE for det meste brukt på lave trykklasser opp til PN 6 og dermed på øverste del av rørgaten.

PE er et fleksibelt materiale og rørene kan legges med en bøyeradius på 30 ganger ytre diameter under installasjon og 60 ganger ytre diameter ved ferdig installert anlegg.

Krav til ringstivhet er et viktig dimensjoneringskriterie i installasjonsveiledningen for plastrør. Det synes å være normalt med en gjennomsnittlig deformasjon av røret over lang tid på 2,5-10 % ved bruk av «gode masser i ledningssonen og vanlige overdekningshøyder» (NPG Norge, 2011). For videre bruk i denne rapporten forutsettes at krav til ledningssonen er overdekning på 0,6 - 3 meter, liten/ingen trafiklast og fare for frost eller utvasking. Ved krav til maksimum relativ deformasjon på nylagte rør på 5% (og 10% etter 5 år), blir «krav til ledningssonen» «middels». Det kan da brukes følgende masser:

- Finpukk (8-22, 4-14) eller singel (8-22)
- Finpukk med maksimal nominell kornstørrelse mellom 4 og 8 mm
- Velgradert grus/grov sand med minimum nominell kornstørrelse 2 mm

Dersom det ikke er fare for «frost eller utvasking» eller det godtas en maksimum relativ deformasjon på nylagte rør på 8% (13% etter 10 år), kan det også brukes:

- Grusholdig sand, grov sand med minimum nominell kornstørrelse 0,2 mm

I innledningen til installasjonsveilederen står det at ved å følge metodene beskrevet i veilederen, kan den forventede relative deformasjonen halveres.

Maksimum tillatt nominell kornstørrelse for trykkledninger av PVC eller PE er gitt i tabell 3:

Rørdiameter [mm]	Velgraderte og naturlige masser	Ensgraderte knuste masser (pukk)
DN < 300	22	22
300 ≤ DN < 600	32	22
DN ≥ 600	40	32

Tabell 3: Største nominelle kornstørrelse for trykkør av PVC og PE, (NPG Norge, 2011)

Metoder for sammenkobling og bend

PE-rør sammenføres enten ved buttsveising eller elektrosvøising. Ved buttsveising klemmes hver av de to rørendene som skal sammenføres mot en varm plate med et bestemt trykk. Plastmaterialet smeltes og etter en viss tid fjernes den varme platen og den smeltede platen i de to endene klemmes mot hverandre med et gitt trykk. Figur 8 viser den hydrauliske jekken som brukes til å håndtere rørene. Ved elektrosvøising tres rørene inn i ei muffe der det ligger en motstandstråd på innsida av muffa. Når det kjøres strøm gjennom motstandstråden smeltes plastmaterialene sammen til ett stykke. Kun rør med samme SDR klasse kan buttsveises sammen. Ved sammenføring av ulike SDR klasser må det brukes elektromuffer tilpasset



Figur 8: Hydraulisk rigg for buttsveising av PE-rør (Hordaland Rørteknikk AS)

SDR klassen på røret, men vær obs på at rørene vil ha ulik indre diameter. Det finnes også mekaniske koblinger for å sammenføye PE rør, men buttsveising eller elektromuffer er det som anbefales. (Hallingplast [1], Hallingplast [2])



Figur 9: Fleksible montasje-muligheter med PE-rør (Hordaland Rørteknikk AS)

Det finnes et stort sortiment med elektrosveisedeler til PE-rør, blant annet bend fra 11 til 90 grader vinkel. Det er også mulig å buttsveise sammen rør som er skåret med vinkel. Ved elektrosveising eller speilsveising av bend smeltes rørdelene sammen og skjøten blir strekkfast.

Når PE-rørene sveises sammen blir de en lang streng med strekkfaste egenskaper, så å si analogt til en vannslange. Det gjør at alle kreftene fra vanntrykket tas opp av røret uten behov for klosser eller forankringer ved bend og retningsendringer. Figur 9 viser fleksibiliteten for tilpassing av grøftetraseen til terrenget. Det er allikevel viktig å forankre rørene godt. PE-tverrsnittet har bare en viss strekkfasthet dersom det blir for store strekk-krefter.

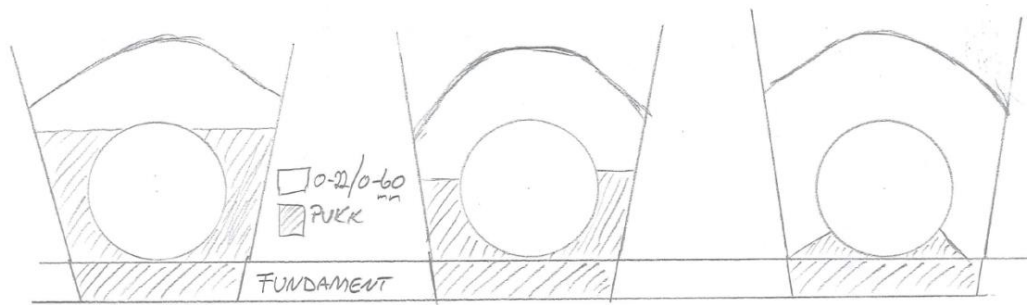
3.1.4 Oppsummering rør

Oppsummert synes det som at PE er mest konkurransedyktig i toppen av rørgata eller der det er behov for strekkfaste egenskaper gjerne i kombinasjon med behov for fleksibilitet til retningsendringer. GRP egner seg best opp til PN 32 der det ikke er for bratt og/eller behov for strekkfaste egenskaper. Duktile støpejernsrør ser ut til å egne seg best i trykklasser høyere en PN 32 og der det er behov for strekkfaste egenskaper og/eller der bruken av grovere/stedlige omfyllingsmasser viser seg lønnsomt.

PE og duktilt deformeres plastisk, mens GRP har en ikke plastisk deformasjon.

3.2 Omfyllingsmasser brukt på rørgater

Omfyllingsmassene brukt rundt et nedgravd rør kan grovt deles inn i bæresone og støttefylling. Bæresonen er fundamentet røret hviler på og skal ta opp vekta av røret og massene over. Støttefyllingens oppgave er å holde røret i riktig posisjon og å hindre skade på rørets ytterkappe fra massene som legges på når grøfta fylles igjen. Det varierer fra rørtype til rørtype hvor høyt opp på røret skillet mellom bæresone og støttefylling går. Det avhenger i hovedsak av rørets behov for sidetrykk for å hindre ovalitet, ettersom det kan være vanskeligere å komprimere sorterte masser tilstrekkelig. Fig 10 viser tre forskjellige situasjoner som er observert i tegninger og i praksis på fordelingen av andel pukke mot andre sorterte masser.



Figur 10: Observerte prinsipper for omfylling; venstre: pukke nesten helt opp til topp rør, midten: pukke opp til 50-60% av diameter, høyre: pukke kun i bæresonen.

Ut fra egne observasjoner og flere intervjuer med anleggspersonell og utbyggere, synes det å være en tendens til at der det før ble brukt pukke rundt hele røret, går det nå mot at en stadig større andel av tverrsnittet fylles av rimeligere sorterte masser. De rimeligere massene er i noen tilfeller knuste masser og i andre tilfeller sortert fra grustak eller morene. Felles er at de inneholder 0-stoff og har en stor variasjon i korndiameterer. Typisk 0-22 mm eller 0-60 mm. Tabell 4 viser fordelingen av type masse brukt på de fire studerte rørgatene. M-tallet viser til prøvenummer.

Kraftverk	Bæresone	Støttefylling	Rørtype
Sundli	8-16 mm knust pukke (M6) kl 1-11	0-22 mm knust, sams masse (M11)	GRP
Væla Tverråne	8-22 mm pukke (M10) kl 2-10 16-22 naturpukke (M7) Prosjektert kl 4-8 (observert kl 12-12 i bratteste skråning)	0-8 mm sorterte morenemasser (M9) 0-60 mm sorterte masser (M8)	GRP Duktil
Nybuelva	16-22 naturpukke (M7) kl 4-8	0-60 mm sorterte masser (M3)	Duktil

Tabell 4: Type masse brukt i bæresone og støttefylling på de fire studerte rørgatene. M(nr) referer til masseprøve nr for friksjonsforsøk.

Figur 11 viser bilde av masseprøvene tatt fra bæresone og omfylling fra Væla kraftverk og Sundli kraftverk.



Figur 11: Materialprøver hentet fra rørgate på kraftverk under bygging. Fra venstre: Støttefylling Væla, bæresone Væla, bæresone Sundli, omfylling Sundli.

3.3 Komprimering

I henhold til NVEs retningslinje referert tidligere, skal «grøftesåle og omfyllingsmasser komprimeres for at rør og rørfundamenter blir liggende stabilt uten fare for setninger eller uforutsigbare tilleggs påkjenninger». Basert dette og besøkene på anlegg under bygging og intervjuer av anleggspersonale, har det å komprimere i forbindelse med legging av rør i grøfter følgende hensikter:

1. Hindre setninger i fundamentet under røret
2. Gi nok støtte i side til å hindre ovalitet
3. Øke spenningene inn mot røret for å øke friksjonskapasiteten
4. Hindre setninger i veier eller andre konstruksjoner som bygges oppå rørgata

Ved å komprimere grøftesålen før røret legges ned i grøfta, sikker man at fundamentet røret ligger på ikke får setninger over tid slik at røret mister støtten under og blir bøyd ned av vekten av vannet i røret og massene over. Dette er spesielt viktig for GRP-rør der det er forskjell mellom produsentene på hvor godt rørene tåler strekk i aksiell retning (nedbøying gir strekk på undersiden av rørtverrsnittet). Metoden for påføring av glassfiberen og hvilke retning evt kontinuerlig glassfiber har, betyr mye for aksiell strekkapasitet. Duktile støpejernsrør er som navnet tilsier duktile og har større kapasitet til å tåle krefter utenfra som gir strekk og trykk i aksiell retning. PE-rør har en elastisitet som gjør at de ved moderate setninger tåler strekk i underside og former seg etter setningen, men de kan få en ovalitet.

Å etablere nok støtte på siden av røret er viktig for at rør med liten ringstivhet som GRP og PE, får den nødvendige støtten mellom klokka 3 og 5 og klokka 7 og 9. Dersom ikke omfyllingsmassene gir nok støtte her vil røret presses ned av vekten av massene over og røret blir ovalt. For å hindre dette er stapping minst like viktig som komprimering. Stapping går ut på å bruke håndtaket på ei krafse, en spade eller en plankebit og manuelt dytte inn og hardstampe omfyllingsmassene inn under røret. Entreprenøren på rørgata på Sundli kraftverk komprimerte først fundamentet, men så ventet de med å komprimere omfyllingsmassene til de var fylt opp til ca klokka 11 og 1. Dette fordi komprimering med kraftig komprimeringsverktøy på et lavere fyllingsnivå ville presse pukken inn under røret og løfte det opp og ut av posisjon. Her ble det brukt puk i fundamentet, så ble det fylt puk opp til ca klokka halv 4 som ble stappet inn under røret manuelt. Så ble det fylt puk vekselvis på hver side videre opp til klokka 11 og 1. Dermed blir manuell stapping svært viktig for å sikre nok støtte i bæresona mellom klokka 4 og 6.

3.3.1 Diskusjon rundt komprimering

Bossel og Haugen (2012) studerte virkningen av komprimering med tanke på glidestabilitet for rør og viste at komprimering rundt røret gav større friksjonskapasitet enn med ukomprimerte masser. Tre mulige årsaker ble vurdert. Konklusjonen fra forsøkene ble at den viktigste bidragsyteren til økt friksjonskapasitet var at økt trykk ovenfra øker spenningene rundt røret fra omfyllingsmassen. Større jordtrykk inn mot røroverflaten øker friksjonen mellom rør og omfyllingsmasser.

Jo brattere helning røret skal legges i, jo viktigere blir glidestabilitet som dimensjoneringskriterie. Komprimering fører som sagt til økt normalspenning inn mot røroverflaten og dermed større motstand mot glidning. Følgelig blir komprimering viktigere

og viktigere jo brattere det blir. Ut fra observasjoner under befaringene, virker det som at god komprimering blir vanskeligere og vanskeligere jo brattere terrenget blir. På Tverråne sa anleggspersonalet rett ut at skråningen ned mot kraftstasjonen var så bratt at det ikke er mulig å bruke vibroplate på en fornuftig måte. Dermed ble det ikke komprimert annet enn den komprimeringa som gravemaskinen gav når den fyllte tilbake grøfta. I denne skråningen brukes det strekkfaste, duktile støpejernsrør. Risikoen ved at det ikke komprimeres vurderes derfor som liten, men anleggspersonalet har helt rett i at det ikke er mulig å få til den komprimeringa som teorien tilsier, i en så bratt skråning. Erfaringen fra dette er at der effekten av komprimering trengs mest, er det også vanskeligst å få det til. Det er lett å få komprimert godt og riktig på flat mark, men da er glidestabiliteten på røret heller ikke noe problem.

På bakgrunn av dette bør beregning av glidestabilitet ikke forutsette komprimering med vibroplate, men bare den komprimeringa gravemaskinen gir når den fyller massene tilbake. Derfor er det ikke gjort komprimering av massene i friksjonsforsøkene, men bare lett klapping med et 20 kg lodd som er sluppet fra ca 2-3 cm høyde. Dette for å imitere effekten av en gravemaskin som slipper massene ned mot røret fra litt høyde eller belter over/klapper på massene når de ligger i grøfta.

Svalesen (2015) diskuterer også langtidseffekten av mekanisk komprimering og den komprimeringa av masser som foregår når vann og frost får jobbet med massene i en vinter eller to. Det er usikkert hvor mye av de økte spenningene mekanisk komprimeringa gir, som blir igjen etter noen år når telen utjevner spenningene mot omgivelsene. Det er også usikkert og hvor mye løst lagrede masser komprimeres over tid og setter opp av spenninger mot røret.

3.4 Studier av anlegg under bygging

I arbeidet med prosjektoppgave høsten 2014 og masteroppgave sommeren 2015 har undertegnede besøkt fire kraftverk under bygging der fokuset for befaringslå på rørgatene og hvordan disse bygges. Det første er Sundli Kraftverk i Orkdal kommune. Der fikk undertegnede være med NVE v/ Dag Bache på tilsyn under bygging. Anleggspersonellet ble også intervjuet om hvordan de utførte rørmontasjen. Det andre kraftverket var Væla kraftverk i Tydal der prosjektleder fra Clemens Kraft viste rundt. Det var ingen arbeidere som utførte rørlegging i Tydal den dagen befaringslå fant sted. Det tredje var Tverråne kraftverk og det fjerde Nybuelve kraftverk, begge ved Nesbyen i Hallingdal. Disse ble befart to ganger, første gang sammen med professor Leif Lia og siste gang kun av undertegnede. Anleggspersonalet ble begge gangene intervjuet om hvordan de utførte bygginga av rørgatene.

I oversiktene videre er det studert tekniske planer for Sundli og Tverråne. Beskrivelsene av Sundli og Væla er hentet direkte fra Svalesen (2015) og bare tilført enkelte tilleggsopplysninger.

Det er tatt jordprøver av omfyllingsmasser og stedlig grøftemasse ved flere av anleggene. Det opplyses i teksten hvor disse er tatt og de betegnes M for masse og et nummer. Disse jordprøvene brukes videre i forsøkene med måling av friksjon mellom masser og rør i kapittel 4. Vedlegg 4 inneholder terrengprofiler og grøftesnitt for rørgatene.

3.4.1 Sundli kraftverk

NVE krever en teknisk plan som skal godkjennes før bygging. Den delen av teknisk plan som omhandler rørgata fikk undertegnede en kopi av og beregningene som ligger til grunn er referert nedenfor.

Anleggsdata

Fallhøyde:	210 meter
Max slukeevne:	846 l/s
Turbin:	Horisontal Pelton med 5 stråler, turtall 750 r/min, rusetall 1150 r/min
Hovedventil stasjon:	DN600 PN 40 spjeldventil
Installert effekt:	1,35 MW
Årsproduksjon:	5,3 GWh
Rørtype:	DN800 GRP PN 6-25 og DN800 duktile støpejernsrør PN30 klasse C30
Rørlengder:	GRP 1761 meter og støpejern 364 meter, totalt 2125 meter
Minstevannføring:	30 l/s
Reguleringshøyde:	Strømtjønna inntaksmagasin: 20.mai-20.august: 1 meter, resten av året 2 m
NVE klassifisering:	Klasse 2

Prosjektering

Rørgata er prosjektert av NTE Energiutvikling i henhold til NVEs retningslinje 1/2011: «Retningslinjer for stenge- og tappeorganer, rør og tverrslagsporter». Forankringspunkter er turbinhus og silkekammer i dam samt 6 rørbend. To av rørbenda er forankra med fjellbolter, mens resten er fundamentert på løsmasser. Det er 6 bekkekryssinger. Ved ett av disse er bekken lagt i rør under rørgata, ved ett går rørgata i friluft over bekken og ved de fire siste går bekkene fritt oppå rørgrøfta. God drenering av rørgrøft og kummer skal vektlegges. Der bekkene krysser fritt oppå rørgata steinsettes bunnen av bekken slik at flomvann ikke graver

seg ned mot røret. Det monteres rørbruddsventil ved inntaket og fire inspeksjonsluker med maks avstand 500 m. Utnyttelse av nominelt trykk settes til 85%.

Beregninger og design (klasse 2 anlegg)

I rørberegningsrapporten har NTE Energiutvikling dokumentert hva som er gjort at beregninger og vurderinger i forbindelse med prosjekteringa av rørgata. I det videre refereres hva som er gjort, hvilke metode som er brukt og resultatet:

Dynamiske beregninger av trykkstøt i rørledninger

Gjennomført med det dynamiske beregningsprogrammet Alab. Dimensjonerende kurve er den der kun hovedventilen lukker på 120 sekund uten demping i siste del av lukkingen. Det gir trykkstøt på 36,5 mVS. Valgt dimensjonerende verdi for trykkstøt på hele rørgata: 40 mVS. Det tilsvarer ca 19,2% av total fallhøyde (som er lavere enn NVEs krav på 30% dersom dynamisk beregning ikke utføres). Trykkstøt ved fullt avslag normal drift: 5,5 mVS. Totalt falltap for inntak, varegrind, rørgate, bend og hovedventil er beregnet til 9,5 mVS.

Detaljert beregning av hver enkelt rørdel

Beregningene er gjort i regneark med informasjon om avstand fra inntak, laveste kotehøgde i rør, stedlig vannsøyle/statisk trykk, karakteristisk trykk, sikkerhetsfaktor, valgt trykkklasse, helningsvinkel rør, vertikal avvinkling mellom rør, horisontal avvinkling mellom rør, relativ belastning, utnyttelse av nominelt trykk (maks 85% utnyttet).

Det kontrolleres for at hvert rørs karakteristiske trykk (summen av statisk trykkehøyde og strykkstøt) ikke overstiger 85% av rørets nominelle trykkklasse.

Kastevidde ved rørbrudd

Beregnes som $kastelengde = \frac{mVS}{2}$

Lengde ved kraftstasjon: $210 \text{ m} / 2 = 105 \text{ meter}$

Innknekkingsstrykk for nedgravd rør

Det refereres til en formelen $p_{krit} = 24 \cdot k \cdot SN \cdot n^2 / (1 - v^2)$ (Hartmann, 2009+2006, s 62). Det er prosjektert med både rørstivhet SN 5000 (N/m²) og SN 10000 (N/m²). og sikkerhetsfaktoren > 2,0. SN10000 har sikkerhet mot innknekkning på 5,37 og SN5000 har sikkerhet på 2,69. Begge er større enn 2,0, men SN 5000 har liten margin for trafikklast.

Beregning av temperaturlast

Prosjekteringa er basert på en minimumsavstand på 10 mm mellom hver rørende og midlere leggetemperatur 10°C. Ekspansjon tas opp i hver muffe. Laveste vanntemperatur 0°C og høyeste 15 °C. Lengdeutvidelseskoeffisient GRP=0,03 mm/m°C og støpejern 0,011 mm/m°C.

GRP kontraksjon 1,8mm < 10 mm og ekspansjon 0,9 mm < 10 mm → OK

Støpejern kontraksjon 0,75 mm < 10 mm og ekspansjon 0,37 mm < 10 mm → OK

Beregning av eksterne krefter for nedgravd rør

Eksterne krefter på røret påføres av vinkelavvik mellom hver rørlengde, jordtrykk og trafikklast. Det legges inn en sikkerhet på $0,5^\circ$ for vinkelavvik ved design. Det vil si at dersom rørprodusentens leggeanvisning tillater 2° skal man ved design ikke tillate vinkelendring større enn $1,5^\circ$ for å dekke opp montasjeunøyaktighet. Det forutsettes minimum 1,0 m overdekning på GRP-rør. Trafikklast dimensjoneres for 80 kN akseltrykk fordelt på to flater med avstand 2,0 meter. Det kontrolleres for innknekking når jordtrykk (19 kN/m²) og trafikklast (70,2 kN/m²) legges på. Fullt vakuum regnes som 10 mVS. Summen av jordtrykk, trafikklast og vakuum utgjør hhv 1,9 mVS + 7,02 mVS + 10 mVS = 18,92 mVS. SN10000 tåler et undertrykk på 52,7 mVS og SN5000 tåler undertrykk på 26,88 mVS. Dvs OK.

Beregning/kontroll av sikkerhet mot glidning i bratte partier med helning over 20°

Beregninga baserer seg på kompendium i dampsikkerhet II (Hartmann 2010) som er beskrevet under pkt 2.2. Det kontrolleres for den bratteste delen av rørgata (helning $26,4^\circ$, 1,6 m overdekning, $1,5^\circ$ avvinkling horisontalt og vertikalt) og den delen av rørgata med høyest trykk. Det brukes en friksjonsfaktor $\mu = 0,25$ og indre friksjonsvinkel $\varphi = 28^\circ$ når massene er tørre og $\varphi = 23^\circ$ når grøfta er vannfylt. Det gir en sikkerhetsfaktor på 1,57 for tørr grøft og 1,25 for vannfylt grøft. Til sammenligning brukte Bossel og Breien (2014) friksjonsfaktor $\mu = 0,62$ og indre friksjonsvinkel $\varphi = 42^\circ$ i sine forsøk.

Beregning av reaksjonskraft i bend og sikkerhet mot gliding og velting betongfundamenter

Beregninga tar utgangspunkt i reaksjonskraft fra vanntrykket og retningen denne har. For klossen med fjellbolter gjøres det en momentbetraktning der det drivende momentet motvirkes av stabiliserende krafta fra fjellboltene. Det kontrolleres at foreslått tverrsnittsareal for boltene er innafor tillat kapasitetsutnyttelse av fjellbolter. Videre beregnes nødvendig innboringslengde på boltene etter NVEs retningslinjer for betongdammer utgave 2 okt. 2005. Største verdi av nødvendig inngysingslengde og dermed minste innboringslengde for overføring av kraft mellom stål/mørtel (960 mm) og mørtel/fjell (1463 mm) blir 1463 mm.

Betongklossene fundamentert på løsmasser tar utgangspunkt i reaksjonskrafta mot fundamentet fra vanntrykket som drivende moment og horisontalkraft. Stabiliserende moment kommer fra vekta av klossens betongsåle, betongen som støpes rundt røret og jordoverdekninga. Kravet her overholdes med svært god margin. Stabiliserende horisontalkraft kommer fra friksjonen mellom jord og betong med friksjonsfaktor $\mu_{\text{jord/betong}} = 0,7$. Det er sikkerheten mot glidning som blir dimensjonerende for klossens størrelse. Kravet til sikkerhet på 1,4 overholdes akkurat. Overdekningen over klossen varierer mellom 1,5 og 2,2 m.

Det er også utført en beregning av bæreevne ved bendene basert på Statens vegvesens håndbok 016 – geoteknikk i vegbygging- kapittel 6 bæreevne. Alle bendene har en beregnet sikkerhetsfaktor på 3 til 4 mellom midlere opptredende vertikaltrykk og midlere vertikal bæreevne.

Beregning av fundamenter ved kryssing av elv ved bro på kote 55

Ved kryssing av elv vurderes to lastsituasjoner som dimensjonerende:

- islast med angrepspunkt 0,25 m under vannstand og normalvannstand regnet som midt på fundamentet
- flomvannstand lik høyden på fundamentet

Det er beregnet størrelse på fundamentene $B \times H \times L = 0,7 \times 1,4 \times 1,4$ m, rørlengde $L = 7,0$ meter og bruk av fire $\text{Ø}32$ mm fjellbolter. Det gjøres en momentbetraktning av drivende og stabiliserende moment for å kontrollere velting med krav om sikkerhetsfaktor $S_v = 1,4$. Sikkerhet mot glidning $S_g = \text{vertikale krefter/horisontale krefter} = 1,5$.

For lasttilfelle 1 er $S_v=2,5$ som er $> 1,4$ og $S_g=4,33$ som er $>1,5$

Lasttilfelle 2 er ikke utregnet. Det vises til at summen av vertikale krefter blir relativt små sammenligna med islasta i tilfelle 1.

Beregning av forankringskloss i kraftstasjonen

Forankringsklossen i kraftstasjonen dimensjoneres for å tåle karakteristisk trykk på $210 + 40 \text{ mVS} = 250 \text{ mVS}$ ved å beregne momentstabilitet om underkant av gulvet i motsatt ende av bygget som røret kommer inn. Det forutsetter at hele betongkonstruksjonen i gulvet kan overføre moment og skjærkrefter fra forankringsklossen og helt gjennom stasjonen til motsatt yttervegg. Sikkerhet mot velting S_v skal være $> 1,4$ og er en momentbetraktning av stabiliserende og drivende moment. Utregnet $S_v=9,01$, som er langt over kravet. Sikkerhet mot glidning S_g skal være $>1,4$ og er en kraftparbetraktning mellom drivende kraft (vanntrykket) og stabiliserende kraft (friksjon betong-jord). Friksjonskoeffisient jord-betong er satt til $\mu=0,7$. Utregnet $S_g=1,40$. Dvs akkurat på kravet. Det gis ingen begrunnelse for verdien av friksjonskoeffisienten jord-betong.

Generelle forutsetninger fra prosjekterende

Det forutsettes at rørene plasseres i henhold til plan og at rørleverandørens leggeanvisninger følges. Omfyllingsmassene skal være ihht anvisninger. Overdekningen minst 1,0 meter. Det kan brukes GRP rør med 3 og 6 meters lengde. Duktile støpejernsrør er designa for bruk av 7 m lengder. Ved større endringer i utførelse må kontrollberegninger utføres og dokumenteres.

Observasjoner fra befarings av leggemetode/omfylling

Utbyggeren har valgt en entreprisform der betaling for rørentreprisen gjøres etter medgått tid, men med et øvre pristak. På den måten vil de sikre seg et entreprenøren bruker den tida som trengs for gjøre jobben ordentlig, samtidig som entreprenøren også har insentiv til å ikke gå ut over den avtalte ramma. De fem grunneierne er hele tiden aktivt med i rørleggingsprosessen. Avtalen er at de leverer rør og grus/pukk fram på grøftkanten og at entreprenøren overtar deretter med selve legginga. Figur 12 og 13 viser et tverrsnitt av grøfta slik den legges. Leggehastigheten varierer svært mye ettersom hvor vanskelig terrenget er. Fra 400 m pr uke ned til 40 m uka etter.

Grøftetversnitt og omfyllingsmasser



Figur 13: Typisk grøftetversnitt for GRP-prosjektet med 8-16 mm pukkk 2/3 opp på røret. Foto: Tor Oxhovd Svalesen



Figur 12: Utlegging av strømkabel og trekkerør. Overfylling med 0-22 mm bærelag etter komprimering før fylling av stedlige masser. Foto: Tor Oxhovd Svalesen

Røra legges nedenfra og oppover i 3 eller 6 m lengder. Det bygges et fundament under røra på 30 cm på løsmasser og 20 cm på fjell som komprimeres med gravemaskin før røret legges ut. Når røret er lagt på plass fylles det 8-16 mm pukkk opp til ca 2/3 av rørets høyde før neste komprimering (masseprøve M6). Entreprenøren poengterte at de ikke komprimerte før fordi det ville presse pukkk inn under røret og føre til at røret løfta seg og fikk feil retning. På den øvre 1/3 av røret og opp til minst 30 cm over røret brukes bærelag 0-22 mm (masseprøve M11). Dette er en fraksjon med en viss andel finstoff som ikke er like permeabel som pukkk. Over bærelaget brukes stedlige masser som varierer mellom leire, sprengstein, sandjordarter og myrjord. Generelt minst 1 m overdekning og 1,6 m i det bratteste partiet på 26°. Maks overdekning er 6 meter. Masseprøve M11 er hentet fra

Overdekninga ble kvalitetskontrollert med bruk av pinner med lengde på en meter som var satt ned på røret. Store deler av grøfta var sprengt ut i fjell. Kvaliteten på fjellet var noe oppsprukket så grøfta ble ofte bredere enn ønskelig og kanten ujevn. Dermed gikk det med betydelig mer pukkk enn beregna.

Det er ikke brukt landmåler på anlegget. I stedet bruker entreprenøren grøftelaser til å holde riktig fall på slake strekninger.

Drenering og kryssing av bekker

Langsmed hele grøfta legges det en 110 mm drensledning i rørfundamentet. Denne føres ut av grøfta med jevne mellomrom, spesielt før og etter bratte partier. Alle drensøråpninger skal kontrolleres jevnlig som en del av internkontrollen på kraftverket. Fig 14 viser en bekkekryssing og fig 15 viser vannføringa i ett av drensrøra som kom ut rett etter denne kryssinga. Den røde traktoren kan sees i begge bildene. 110 røret går helt full med vann og indikerer betydelig vanntransport i rørgrøfta. Dybden fra bunnen av bekken og ned til topp rør var i størrelsesorden 2-2,5 meter og det er støpt ei plate i bekkeleiet for å hindre utgraving. Rundt røret er det ei grustetting der traktoren står for å hindre sivevannet i å følge grøfta videre.



Figur 14: Bekkekryssing Sundli Kraftverk, foto: Tor Oxhovd Svalesen



Figur 15: 110 mm drenerør som går fullt etter bekketryssing. Foto: Tor Oxhovd Svalesen



Figur 16: Støpt såle ved åpen kryssing av bekk over rørgate. Foto: Tor Oxhovd Svalesen

Ved et par punkt nedenfor lange, bratte partier lages det også en betongpropp med leire oppå for å hindre at sigevann skal følge grøfta hele traseen. Figur 20 viser kryssing av bekk der bekken krysser ca 90 grader på rørtraseen. Den støpte betongsålen og steinsettinga er ment å hindre at bekken skal erodere seg ned mot rørgata ved stor vannføring.

Bygging av forankringsklosser

Den planlagte forankringsklossen som skulle boltes til fjell ble gjort om til forankringskloss i løsmasser fordi det ikke var godt nok hold i fjellet. Forankringsklossene bygges slik at først støpes bunnplata, så legges røret over bunnplata. Deretter forskales og armeres det rundt bendet før betongen helles i. Til slutt fylles klossen ned med foreskrevet overdekning. Figur 18 og 19 viser bend B7 med 30 graders retningsendring før det skal støpes rundt.



Figur 18: Armering av bend B7 (30°). Inn mot røret er det lagt en duk som skal hindre at betongen hefter direkte i GRP-materialet. Foto: Tor Oxhøvd Svalesen



Figur 17: Bend B7. Legg merke til størrelsen på plata i forhold til selve klossen rundt røret. Foto: Tor Oxhøvd Svalesen

Andre forhold observert og diskutert på befaringa

Fokus på pris kan føre til at legging gjennomføres under dårlige forhold. Det nevnes spesielt legging av rør på frossen grunn. Entreprenøren som var ansvarlig for rørmontasjen, Jerpstad Maskin, la ikke rør vinterstid, men di visste om andre som gjorde dette. Legging på vinteren mente flere av de sakkyndige personene på befaringa gav stor fare for ovalitet pga setninger når telen går ut av massene.

Å engasjere Sivilingeniør Edvin Bakken AS til ekstern kvalitetskontroll av entreprenørens egenkontroll av utførelsen, er noe byggherren har valgt selv. Det har ikke vært pålagt av NVE. NVE har allikevel stilt en del krav til sjekklister og egenkontroll i byggefasen som Edvin Bakken nå er med og dekker opp. Kontrollplan fra bygginga som skal sendes inn til NVE underveis og når anlegget er ferdigstilt. Når anlegget er ferdigstilt kommer det krav om VTA ettersom det er klassifisert i klasse 2.

3.4.2 Væla kraftverk

Væla kraftverk ligger i Tydal kommune. Utbygger er Clemens Kraft AS. Rørgata har jevnt fall på gjennomsnittlig 10% og er klassifisert i klasse 0. Installert effekt er 0,9 MW med årsproduksjon ca 3,2 GWh/år. Verket har konsesjonsfritak og bygges etter kommunal byggesaksbehandling i Tydal kommune. Det er to krav som NVE har pålagt; dammen har klasse 1 og det er fastsatt ei minstevassføring. Ellers er ikke NVE inne i byggeprosessen i form av kontroll i byggetida. Kommunen har ingen egen oppfølging eller tilsyn i byggeperioden.

Bildene fra befaringa er gått tapt, så her refereres bare notatene fra samtalene med prosjektleder. Det var ingen fra entreprenøren til stede under befaringa.

Leggemetode og omfylling

Rørgata er 780 m lang og består av DN900 PN6 og PN10 GRP rør fra Flowtite. Såle og omfylling er puk 8-16 mm evt 8-22 mm som fylles opp til klokken 10 og klokken 2 (masseprøve M10). På toppen av røret legges det 0-8 mm sorterte morenemasser (M9). Pukken komprimeres mens morenemassene og de øvrige massene over legges på

ukomprimert. Ovalitet horisontalt og vertikalt måles ved legging og etter 2-3 uker. Det legges med 110 mm drenerør i fundamentet som føres ut av grøfta for hver 200 meter. Rørene legges nedenfra og oppover mot inntaket.

Kontrollrutiner

Byggherren/prosjektlederen utfører selv kontrollen med entreprenørens utførelse og sjekker punkter som ovalitet, kvalitet på omfyllinga og avvinkling i rørmuffene. Med jevne mellomrom leies det inn landmåler som kontrollerer at sideveis plassering og høyde er riktig. Han måler også inn de røra som er lagt. I dette prosjektet kjenner byggherre og entreprenør hverandre fra tidligere prosjekt og baserer samarbeidet på tillit og entreprenørens internkontroll/egenkontroll.

Da rørlegginga startet kom det en person fra leverandøren Brødrene Dahl og holdt et kort kurs for alle som skulle være med i grøfta under bygging og hva som var viktig å huske på.

3.4.3 Tverråne kraftverk

Anleggsdata

Tverråne kraftverk ligger i Nesbyen kommune i Halingdal. Utbygger er Norsk Grønnkraft AS (NGK). Vannet hentes i et bekkeinntak og ledes gjennom ei 2070 meter lang rørgate ned til kraftstasjonen. Rørgata består av tre typer rør. Bekkeinntaket er en gravitasjonsdam i betong med en bredde på 20 meter og en største høyde på ca 3 meter. Anlegget er konsesjonsfritt og plassert i klasse 0. NGK opplyser at anlegget bygges om etter klasse 1. Teknisk plan er utarbeida av Brødrene Dahl.

Fallhøyde:	308 meter
Max slukeevne:	1,2 m ³ /s
Installert effekt:	3,0 MW
Årsproduksjon:	7,8 GWh
NVE klassifisering:	Klasse 0
Trykkstøt:	18% av brutto fallhøyde
Dim trykk:	362 m.V.S

Rørgata har følgende data: (profil 0 ved kraftstasjonen)

Rørtype, dimensjon	Trykkklasse	Dimensjon	Lengde	Lengdeprofil	Merknad
Strekkfaste, duktile støpejernsrør	C40 og C30	DN 700	350 meter	0-350	Største helning 26,8 grader
Duktile støpejernsrør	C25	DN 700	600 meter	350-950	
PE-rør	SRD 17 og SDR 26	Ø 800 mm	1120 meter	950-2070	

Tabell 5: Rørgate Tverråne kraftverk, trykkklasser og rørtypen

Beregninger og design (klasse 1 anlegg)

Basert på teknisk plan er følgende beregninger gjort i prosjekteringen:

Dynamiske beregninger av trykkstøt i rørledninger

Trykkstøt er beregnet til 18 % av brutto fallhøyde på 308 mVs, fastsatt til 54 mVs. Dette gir høyeste karakteristiske trykk på 36,2 bar. (som er lavere enn NVEs krav på 30% dersom dynamisk beregning ikke utføres).

Detaljert beregning av hver enkelt rørdel

Skal være utført men beregningene ligger ikke ved eksemplaret av teknisk plan. Det som står i teknisk plan er følgende tabell:

Rør	Kotehøgde (moh)		Statisk Trykk mVs	Karakteristisk Trykk mVs	Tillatt trykk	Lengde m
	Start	Slutt				
HRV	737	737				
PE SDR26	737	708	29	48	50	770
PE SDR17	708	690	47	78	78	320
PE SDR13,6	690	674	63	92	99	80
C25	674	530	207	248	250	610
C30	530	487	250	300	300	120
C40	487	429	308	370	400	170
Stasjon	429		308			

Figur 3-: Beregning av trykkklasse på rør, Tverråne kraftverk

Innknekkingsstrykk for nedgravd rør/rørbrudd

Det fremgår ikke konkrete beregninger, men det blir monter luftør i inntakskonstruksjonen for å sikre inn- og utlufting av innløpsrøret under tømming og fylling av rørgate. Lufterøret er dimensjonert slik at lufthastigheten gjennom røret blir mindre enn 50 m/s ved rørbrudd. Det gir dimensjon DN300. Det monteres en spjeldventil i duktilt støpejern som rørbruddsventil etter innløpskonsus.

Beregning av temperaturlast

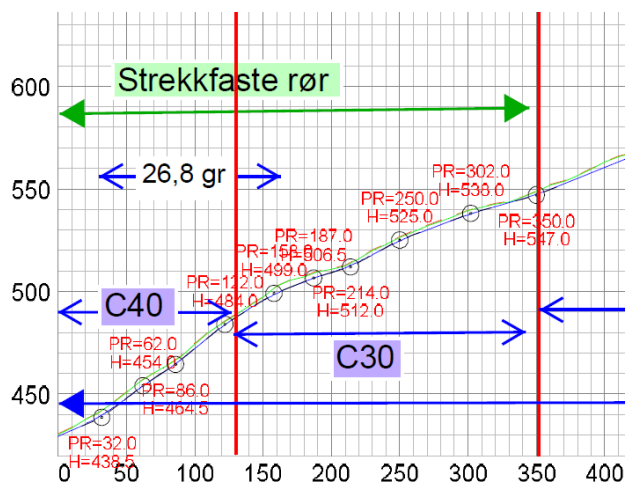
Er utført for PE-rørene: 15 °C temperaturforskjell og lengdeutvidelseskoeffisient PE=0,16 mm/m°C gir lengdeendring på 2808 mm. Det oppgis ikke hvordan disse kreftene skal tas opp.

Beregning av glidestabilitet og bendkrefter for nedgravd rør

Eksterne krefter på røret påføres av vinkelavvik mellom hver rørlengde, jordtrykk og trafikklast. Planen for rørgata har rom for lokale terrengetilpasninger underveis, men med største tillatte vinkelavvik på 1,5 grader på strekkfaste duktile støpejernsrør, 2 grader på de duktile støpejernsrøra og minste kurveradius på 50 m på PE-ledningene. Det legges inn en sikkerhet på 0,5° for vinkelavvik ved design. Disse tallene gjelder design slik at kravet om montasjeunøyaktighet på 0,5° kommer i tillegg til disse. Overdekning er beregnet i forhold til utadretta bendkraft og glidestabilitet i regneark utarbeida av Ragnar Hartmann.

Beregning/kontroll av sikkerhet mot glidning i bratte partier med helning over 20°

Beregninga baserer seg regneark utarbeida av Ragnar Hartmann. Overdekninga er satt til >0,8 meter for PE-rørene, >1,1 meter for duktile støpejern og >0,8 meter for strekkfaste duktile støpejern. Det er valgt strekkfaste rør i den nedre og bratteste delen av rørgata med helning på 27 grader. Snitthelninga ellers i rørtraseen ligger på 2,4° for PE og 13 ° for de duktile støpejerna. Det brukes en friksjonsfaktor $\mu=0,5$.



Snitthelninga til høyre for den røde streken på profil 140 er 15 grader og dermed ikke krav om beregning av glidestabilitet.

Figur 3-19: Utsnitt fra lengdeprofil på rørgate, Tverråga kraftverk (Norsk Grønnkraft AS)

Beregning av reaksjonskraft i bend og sikkerhet mot gliding og velting betongfundamenter

Det oppgis ikke i teknisk plan at det skal brukes betongklosser for fundamentering eller opptak av reaksjonskrefter bortsett fra forankringsklossen nede i kraftverket.

Observasjoner fra befaringa av Tverråne kraftverk

Anlegget ble befart to ganger, første gang 29/6 2015 og andre gang 4/8.2015. De nederste 300 meterne av traseen var avdekka ved den første befaringa og basert på informasjon fra anleggsarbeiderne ble det prenging av fjell langs det meste av rørtraseen. Rørlegginga var ennå ikke kommet i gang. Massene langs traseen de første 200 metrene bar preg av grus og morenejord med en mektighet på minst 2 meter flere steder. Figur 20 viser eksempel på dette.



Figur 20: Grus/Morenerygger i grøftetraseen ca 200 meter opp for Tverråne kraftverk. Personen holder en tommestokk på 2,0 m. Masseprøve M1 er hentet like ved. (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen)

Det ble tatt to jordprøver av dette materialet to forskjellige steder i skråningen, disse er omtalt som M1 og M2 i friksjonsforsøkene. Lengre opp i traseen var det et tynnere lag med masser og dermed blir andelen jord/humusholdige masser noe større. Figur 22 viser eksempel på dette.

Ved andre gangs befaring var rørlegginga kommet ca 150 meter opp for kraftstasjonen. De strekkfaste rørene ble lagt nedenfra og oppover. Skråningen var for bratt de første 140 meterne til at det var mulig å kjøre dumper med pukk opp langs rørgata. Derfor ble pukken som ble brukt til omfylling belta opp en og en skuffe med gravemaskin. Entreprenøren anslo at dette arbeidet tok minst to dager ekstra sammenligna med framdrifta de erfaringsmessig skulle hatt. I henhold til beskrivelsen skulle det brukes 0-60 mm sorterte masser på øvre halvdel av røret. På tidspunktet for befaring var det siste røret lagt med pukk rundt hele røret, se figur 23. Anleggsarbeiderne fortalte at det ikke ble komprimert med vibroplate på siden eller over røret i det bratte partiet fordi det rett og slett var for bratt til å få det til på en fornuftig måte.



Figur 22: Eksempel på grøfteprofil ca 350 meter oppfor Tverråne kraftverk.: Humuslag på toppen, noe morenejord i varierende tykkelse og til dels kort vei ned på fjell. Ved god planlegging er det mulighet for å ta vare på morenelaget før boring og sprening. (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen)



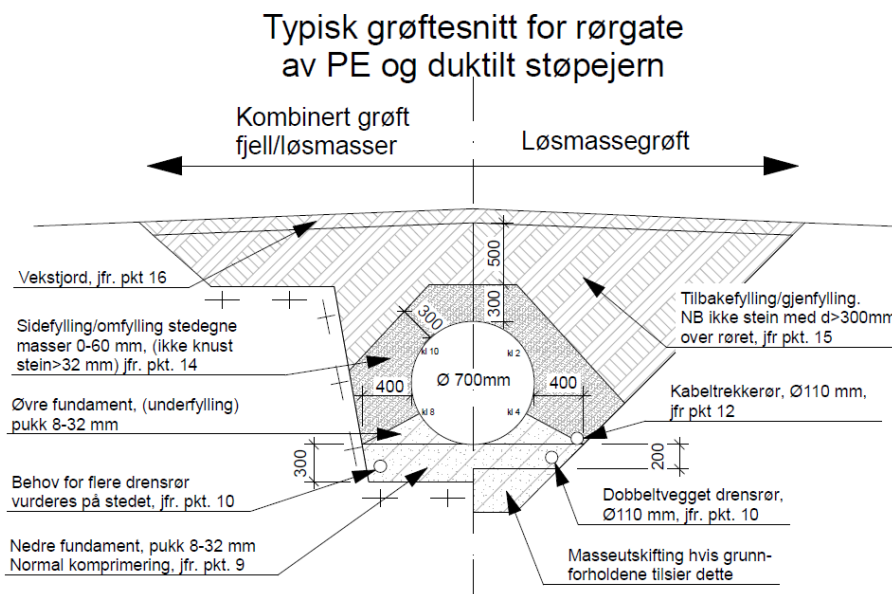
Figur 21: Tverråne kraftverk, nedfylt rørgate ca 200 meter opp for kraftstasjonen. Masseprøve M2 er tatt i dette området. (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen)



Figur 23: Tverråne kraftverk ca 200 meter opp for kraftstasjonen, nedfylt rørgate, tilsynelatende med pukk rundt hele eller store deler av røret. (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen)

Grøftetverrsnitt og omfyllingsmasser

Det brukes 8-22 mm pukk i bæresonen opp til ca klokka 4 og 8 (masseprøve M7). På resten av tverrsnittet brukes 0-60 mm sorterte morenemasser fra grustak (M8). Figur 24 viser prosjektert grøftetverrsnitt med minste tykkelse 400 mm på omfyllingsmasse på nedre halvdel av røret og 300 mm på øvre. Over dette legges stedlige maser med maks steindiameter 300 mm.

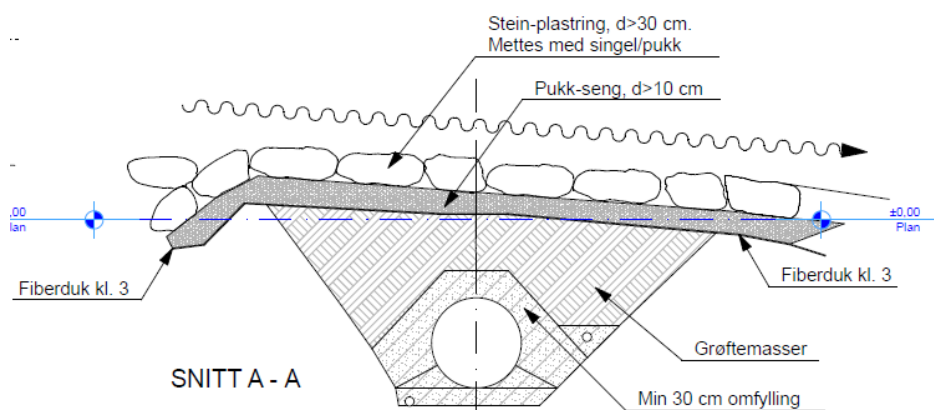


Figur 3-24: Typisk grøftetverrsnitt for rørgate av PE og duktilt støpejern, (Norsk Grønnraft AS)



Figur 25: Legging av rørgate Tverråga, overgang fra strekkfaste til ikke strekkfaste (blå rør). (Foto: Norsk Grønnkraft AS)

omkringliggende masser brukes det fiberduk for å beskytte dreneringa. Det ble ikke observert bruk av fiberduk på de to befaringene. Lengdeprofilen på rørgata (Vedlegg 4) indikerer ikke kryssing av bekk og det ble ikke observert andre forhold som gav ugunstige forhold for dreninga. Med bruk av omfyllingsmasser over rørfundamentet med såpass stor andel 0-stoff som observert her, bør ikke overflatevannet komme så lett til bæresonen. Dette avhenger og av at tilbakefyllingen av sprengstein ikke skaper «steinreir» som vannet trekker ned i og ledes mot rørgata. Figur 26 viser snitt av prosjektert løsning for bekkekryssing.



Figur 26: Prosjektert løsning for bekkekryssing Tverråga og Nybuelve kraftverk. (Norsk Grønnkraft AS)

Andre forhold observert og diskutert på befaringa

I og med at rørene legges i pukk i den bratte helninga ovenfor kraftstasjonen synes det som at utbyggeren ikke utnytter helt de egenskapene som er mulig å benytte med strekkfaste rør med stor ringstivhet.

Grøftesålen komprimeres. Det fremheves i leggeanvisningen at duktile rør er ringstive og det er derfor ikke nødvendig å komprimere omfyllingsmassene. PE-rør er fleksible og tåler noe deformasjon, men det er viktig at rørene har god sidestøtte for å hindre deformasjon. Figur 25 viser legginga av strekkfaste rør (svarte) og overgangen til ikke strekkfaste rør (blå). Bildet viser nivået pukken fylles til før det brukes sorterte masser på resten av omfyllinga.

Drenering og kryssing av bekker

Prosjekteringa tilsier at det legges dobbelvegga 110 mm drensrør som føres ut av grøfta med 100 til 200 meters mellomrom. Der drensrøret ledes ut av grøfta legges det i en terskel av tette masser

slik at sigevann ledes ut av grøfta. Terskelen skal gå 1/3 opp på røret. Der det er fare for tilslemming av finstoff fra

3.4.4 Nybuelve kraftverk

3.1.1 Anleggsdata

Nybuelve kraftverk ligger i Nesbyen kommune i Hallingdal. Utbygger er Norsk Grønnkraft AS (NGK). Utbygging skjer samtidig med Tverråne kraftverk med i hovedsak samme entreprenører og leverandør på rørgata. Vannet tas inn i et bekkeinntak. Inntaket og betongdammen blir ca 2 meter høyt og 10 meter bredt. Rørgata er 2835 meter lang består av en kombinasjon av PE og duktile støpejernsrør. Anlegget er konsesjonsfritt og plassert i klasse 0. NGK opplyser at anlegget bygges som etter klasse 1. Teknisk plan er utarbeida av Brødrene Dahl. Kraftverket ligger i samme sidedal som Tverråne, ca 15 minutters kjøretur lengre sør.

Fallhøyde:	540 meter
Max slukeevne:	0,794 m ³ /s
Installert effekt:	3,56 MW
Årsproduksjon:	7,1 GWh
NVE klassifisering:	Klasse 0
Trykkstøt:	15% av brutto fallhøyde
Dim trykk:	625 m.V.S

Rørgata har følgende data: (profil 0 ved kraftstasjonen)

Rørtype, dimensjon	Trykkklasse	Dimensjon	Lengde	Lengdeprofil	Merknad
Duktile støpejernsrør	C30 – C64	DN 600	1850 meter	0-1850	
PE-rør	SDR 11, SRD 17 og SDR 26	Ø 710 mm	985 meter	1850-2835	

Tabell 6: Nybuelve kraftverk, trykkklasse, dimensjon og lengde.

Beregninger og design (klasse 1 anlegg)

Basert på teknisk plan er følgende beregninger gjort i prosjekteringen:

Dynamiske beregninger av trykkstøt i rørledninger

Selve utregningen er ikke vist i dette eksemplaret av teknisk plan. Det opplyses at «Det er utført detaljert trykkstøtsberegning langs traseen som gav betydelig høyere prosentvis trykkstøt i området ved profil 2000-2785 enn nede ved stasjonen» Trykkstøt er beregnet til 15 % av brutto fallhøyde på 543 mVs, fastsatt til 82 mVs nede ved stasjonen. Dette gir høyeste karakteristiske trykk på 62,5 bar. (NVEs krav er at trykkstøtet settes til 30% dersom dynamisk beregning ikke utføres).

Detaljert beregning av hver enkelt rørdel

Den tekniske planen oppgir følgende tabell som beregner trykk-klassene på rørgata:

Rør	Kotehøgde (moh)		Statisk Trykk mVs	Karakteristisk Trykk mVs	Tillatt trykk	Lengde m
	Start	Slutt				
HRV	853	853				
PE SDR26	853	831	22	44	50	660
PE SDR17	831	815	38	76	78	100
PE SDR11	815	770	83	125	125	200
C30	770	595	258	300	300	800
C40	595	505	348	400	400	350
C50	505	420	433	498	500	250
C64	420	310	543	624	640	450
Stasjon	310		543	624		

Tabell 7: Nybuelve kraftverk, beregning av trykkklasse på rørgate

Innknekkingsstrykk for nedgravd rør/rørbrudd

Det fremgår ikke konkrete beregninger, men det blir monter luftør i inntakskonstruksjonen for å sikre inn- og utlufting av innløpsrøret under tømning og fylling av rørgate. Lufterøret er dimensjonert slik at lufthastigheten gjennom røret blir mindre enn 50 m/s ved rørbrudd. Det gir dimensjon DN300. Det monteres ikke rørbruddsventil på dette anlegget.

Beregning av temperaturlast og spenninger

Er utført for PE-rørene: 15 °C temperaturforskjell og lengdeutvidelseskoeffisient PE=0,16 mm/m°C gir lengdeendring på 2232 mm. Det oppgis ikke hvordan disse kreftene skal tas opp. Opptredende spenninger på grunn av innvendig trykk i PE-røret kontrolleres mot maks tillatt spenning på 10 N/mm² og en materialfaktor på 1,6. Det vil si at dimensjoneringskriteriet er en spenning i plasten på 6,25 N/mm². Beregnet spenning i plasten er som følger:

Trykkklasse	Beregnet spenning i rørveggen
Ø710 SDR26	5,52 N/mm ²
Ø710 SDR 17	6,03 N/mm ²
Ø710 SDR11	6,25 N/mm ²

Tabell 8: Beregnet spenning i rørveggen PE-rør Nybuelve kraftverk

3.1.3.6 Beregning av glidestabilitet og bendkrefter for nedgravd rør

Det er gjort beregninger på minste overdekning på grunn av sideveis og oppadretta krefter fra avvinkling. Kalkulasjonen er gjort på nederste kotehøyde i hver enkelt trykkklasse med krav om sikkerhetsfaktor > 1,5 ved drenert grøft og >1,1 ved vannfylt grøft. Beregningene baserer seg på regneark utarbeida av Ragnar Hartmann. Tabell 9 viser beregnede minste overdekning ved ulike avvinklinger og trykkklasse.

Profil	Rørtype	Klasse	Avvinkling	Overdekning
1850 - 2780	PE	SDR 13,7, 17 og 26	-	> 0,80
1400 - 1850	Duktile st.jern	C30	< 2,0	> 1,00
1050 - 1400	Duktile st.jern	C30	< 2,0	> 1,20
700 - 1040	Duktile st.jern	C40	< 1,5	> 1,20
700 - 1040	Duktile st.jern	C40	< 2,0	> 1,75
450 - 700	Duktile st.jern	C50	< 1,5	> 1,75
450 - 700	Duktile st.jern	C50	< 2,0	> 2,25
350-450	Duktile st.jern	C64	< 1,5	> 1,75
350-450	Duktile st.jern	C64	< 2,0	> 2,50
250 - 350	Duktile st.jern	C64	< 1,0	> 1,75
0-350	Duktile st.jern	C64	< 0,5	> 1,20

Tabell 9: Nybuelve kraftverk, rørgate, beregning av nødvendig overdekning basert på trykk og avvinkling
Planen for rørgata har rom for lokale terrengetilpasninger underveis, men med største tillatte vinkelavvik på 2 grader på de duktile støpejernsrøra og minste kurveradius på 100 m på PE-ledningene. Disse tallene gjelder design slik at kravet om montasjeunøyaktighet på 0,5° kommer i tillegg til disse.

Beregning/kontroll av sikkerhet mot glidning i bratte partier med helning over 20°

Planlagt rørgate har en gjennomsnittlig stigning på 11 grader. Største stigning er 20 grader over en lengde på 50 meter. Det er gjort stabilitetsberegninger på overgangene mellom trykklasser og ved pel 1400, men disse ligger ikke ved.

Øvrig

Ved maksimal slukeevne på 800 l/s er hastigheten på vannet i DN 600-røra ca 2,8 m/s.

Det poengteres spesifikt at ved sammenkobling mellom rørgate og innstøpningsrør i stasjonen skal «lengdetilpasning tas i rør nr 2 nedenfra. Rør nr 1 kappes IKKE».

Observasjoner fra befaringa

I og med at Nybuelva og Tverråne bygges samtidig er mye likt ved de to kraftverkene. Leggeanvisningene er de samme og det er samme entreprenør. Informasjon om grøftetverrsnitt, omfyllingsmasser, drenering og bekkekryssinger har like løsninger som for Tverråne og det vises til avsnittene der.

Ved første befaring 29/6 var rørlegginga godt i gang. Figur 27 viser legging av duktile støpejernsrør ca 300 meter opp for kraftstasjonen. Bøttene på bildet inneholder masseprøvene M3



Figur 27: Nybuelve kraftverk, legging av duktile støpejernsrør. Masseprøvene M3 og M7 er tatt fra omfyllingsmassene på bildet (Foto: Tor Oxhøvd Svalesen)

fra omfyllinga og M7 fra fundamentet. Prøvene er tatt direkte i grøfta fra det som er fyllt rundt røret. Grøftebunnen komprimeres med vibroplate før rørene legges nedi. Ved montasje tas det først bilde av begge rørendene, så legges pakningen i og det påføres glidemiddel. Gravemaskinen brukes til å entre rørene i hverandre først med stropp, så brukes baksiden av skuffa mot en treplanke i enden til å få klemme rørene sammen til rett avstand. Så rettes røret opp til den retningen det skal ha før det fylles pukk på siden og røret løftes med stropp til det når den posisjonen i høyde og bredde det skal ha. Det kontrolleres at pakningen sitter på rett plass ved å stikke en tynn metallplate inn mellom røret og yttermuffa for å måle avstanden inn til pakningen. Entreprenørens egenkontroll med utfylling av sjekklister og fotografering ble utført.

3.5 Diskusjon

3.5.1 Byggemetoder

Figur 28 er bilder fra Nybuelve og viser hvordan et typisk anleggsområde ser ut under rørlegging med grøft og kjørevei for inntransport av rør, masser og maskiner. Det viser også at terrenget varierer nedover dalsida og at overdekningen kan bli relativt stor for å få en jevn helning på røret uten for stor avvinkling i skjøtene. Det kan gi til dels store variasjoner i overdeknings høyden. I den sammenheng er det verd å merke seg at krav til minimum overdekning beregnes etter det laveste punktet pr trykkklasse. Duktile støpejernsrør tåler opp til 4 graders avvinkling avhengig av muffe- og pakningstype, men ofte brukes bare to grader som dimensjoneringskriterie for å forenkle installasjonsarbeidet og redusere risiko for feil montering. Ved store overdekninger på grunn av naturlige terrengvariasjoner kunne en større avvinkling vær brukt for å spare tid og resurser, men dette krever at kyndig person gjør disse vurderingen på plassen.



Figur 28: Nybuelve kraftverk, oversiktsbilder bygging av rørgate. Entreprenør i gang med bildetaking og egenkontroll til venstre, graving av grøft til høyre.. (Foto Tor Oxhøvd Svalesen)

Bruk av stedlige masser til omfylling rundt rør på kraftverk er svært sjelden brukt, til tross for at leggeanvisningen på flere av rørtypene tillater fraksjoner som muliggjør dette. Det til tross for at vann og avløpsbransjen i en del tilfeller fyller stedlig masse tilbake rundt de samme typer rør som kraftbransjen bruker.

Med tanke på alt ekstraarbeidet med å belte ei og ei skuffe med pukk opp skråningen på Tverråne og de morenemassene som fantes i grøftetraseen, burde rørene ved Tverråne blitt lagt i stedlige masser. Leggeanvisningene tillater det og massene kunne blitt sortert ut med en dyrkingsskuffe eller en roterende soldeskuffe på gravemaskinen. Friksjonsforsøkene i kapittel 4 viser at friksjonsegenskapene mellom de stedlige massene og rør er minst like god som den delvis knuste, delvis avrunda pukken som ble brukt. Dette er spesielt interessant sett i sammenheng med at Norsk Grønnkraft sier pukk og transportlengde er en sentral faktor for prisen på rørgata.

3.5.2 Bruk av strekkfaste bend og klosser

Basert på intervju med flere aktører i bransjen er det trolig bare to kraftverk som er bygd med strekkfast bend. Det er Tverråga kraftverk i Hemnes og Jora kraftverk i Kvam. Jora utnytter også de strekkfaste egenskapene til rørgata. Norsk Grønnkraft er utbygger på begge to og svenske Vattenfall var prosjekterende på Jora. Rørgata er bygd i bratt terreng med DN 600 duktile, strekkfaste rør. Teknisk plan er godkjent av NVE og utnytter materiale og produktspekter slik at flate partier av rørgata brukes som forankring for de bratte. Friksjonen mellom rør og omfyllingsmasser på flate partier overføres via de strekkfaste skjøtene og gjør

rørgata stabil i de bratte partiene. Som eksempel brukes et strekke på 30 meter med 3 meters dybde på øversida av en skråning, til å forankre rørene i skråningen. Det ble også brukt et strekkfast bend på 35 grader og de unngikk dermed å støype forankringskloss, slik tradisjonell metode hadde vært.

Jora er et prosjekt som utnytter rørmaterialet og bruker de strekkfaste egenskapene som er tilgjengelig, til å fordele bendkreftene som oppstår ut i rørmaterialet og over i omfyllingsmassene. Å bruke strekkfaste bend og rør med en nødvendig forankringslengde basert på friksjonen mellom jord og rør, til å balansere bendkreftene fremstår som en tidsbesparende og kosteffektiv løsning i stedet for å støype forankringsklosser i betong. Det er en løsning som burde blitt brukt i mye større grad enn i dag.

I intervjuene kom det også fram at det er en del forskjell mellom konsulentene på hvilke løsning de presenterer. Norconsult kom til at det måtte inn betongklosser for å forankre rørgata på Tverråga, men Multiconsult kom til at det ikke var nødvendig og det ble brukt strekkfast bend i stedet. I prosjektene Nybuelve og Tverråne var det opprinnelig tenkt å bruke en del stedlige masser til omfylling rundt rørgatene. Av ukjent årsak ble dette gått bort ifra og det ble i stedet brukt innkjøpte sorterte masser. Basert på siktekurvene av stedlige masser M1 og innkjøpte masser M3 og M8, fremstår stedlig masse med bedre egne siktekurve til omfylling enn det som kjøres inn.



Figur 29: Rørgate Fall kraftverk med betongklosser på hver retningsendring. Bruk av strekkfaste skjøte burde vært vurdert. (Foto: Arne Hamarsland, NVE)

Figur 29 viser et bilde av en del av rørgata ved Fall kraftverk. Dette er et prosjekt der bruk av strekkfaste bend burde gitt god gevinst.

Forholdet til finstoff ned i bæresonen og drenering

Et argument som er fremført flere ganger mot å bruke stedlige masser, er at finstoffet vil trenge ned i pukklaget og redusere den drenerende evnen som pukklaget skal ha for å lede bort vann. Bekymringen for dette kan være berettiget, men kornfordelingskurvene fra masseprøvene viser at det som brukes i dag av flere forskjellige aktører i bransjen, har minst like stor andel finstoff som de stedlige massene på sida av grøfta. Ingen av de befarte anleggene bruker fiberduk til å separere bæresonen fra resten av omfyllingsmassene, selv om alle innkjøpte, sorterte masser bortsett fra på Sundli består av minst 40% sand. Sundli er også i en særstilling med tanke på mengde pukklaget rundt røret og dermed stort areal som finstoffet kan fordele seg over. Bruk av fiberduk til å separere massene bør vurderes mer nøye enn det gjøres i dag, basert på disse observasjonene.

Et argument mot fiberduk er at den kan gå tett over tid. Det kan allikevel hende det kan være hensiktsmessig. Norsk Grønnkraft (NGK) refererte spesielt til ett prosjekt, Kinnforsen i Vefsn, der den nedgravde rørgata var bygd med mye pukk i grøfta og samla opp store mengder vann som fulgte grøfta nedover. NGK mener de kunne redusert mye av vannet hvis det hadde vært brukt tettere masser rundt og over røret.

Dersom rørgata krysser ei dalside eller går på skrå nedover langs denne, vil grøfta fungere som en stor avskjærende drenering som samler mye sigevann. I de stedlige masene som finnes i dalsida fra før er det sjelden det samler seg mye vann. Et argument for å bruke en større andel vellgraderte stedlige eller tilkjørte masser er at forholdene for overflatevannet og det vannet som kommer sigende gjennom dalsida, møter de samme forholdene i rørgata som ellers i området. Vannet vil ikke så lett trenge ned til bæresonen på rørgata og ledes langs røret. Ved siden av pris og mindre transport er trolig dette en av de største fordelene ved bruk av stedlige og/eller finkornige masser. Den vesentligste oppgaven til dreneringa må være å hindre at det bygger seg opp poretrykk mot bæreflaten på undersida av røret. Med relativt tette masser i omfyllingssonen og en fiberduk som er delvis tett rundt bæresonen, vil fortsatt fundamentet være drenert og funksjonen opprettholdes.

Kontroll i byggefasen

Svalesen (2015) viser at den viktigste årsaken til rørbruddene som har skjedd de siste fire årene er manglende kyndig kontroll av utførelsen. Dette er ikke kritikk av de byggherrene som har tatt imot besøk på verkene som er under bygging, men en mer generell betraktning rundt hvordan dagens byggeprosjekter synes å være organisert. Basert på funnene til Svalesesen (2015) og oversikten over rørbrudd som ligger ved som vedlegg 3, er det viktigste tiltaket for å få ned antallet rørbrudd som ikke har med materialfeil å gjøre, økt kyndig kontroll fra byggherrens side. For at byggherren skal ha mulighet til å avdekke mangler ved utførelsen må det være en byggherrerepresentant til stede. Ved intervju av utbyggere går det fram at de prioriterer å benytte entreprenører de har tillit til og at kvaliteten i høy grad baseres på tillit.

I denne sammenheng er Sundli kraftverk i en egen klasse ettersom grunneierne bygger i egen regi og er direkte engasjert i bygginga av rørgata. De vil ha god kontroll med entreprenørens utførelse. For de større utbyggerne som ikke har mulighet til å følge opp på samme måte, virker omfanget av byggherrekontroller å være ganske lavt. Kvalitetskontrollen synes å basere seg på entreprenørens fotografier av utført muffemontasje og sjekklister som fylles ut av entreprenør. Noen steder måles rørene inn av landmåler og det kontrolleres for ovalitet inne i røret. På både Nybuelve og Tverråne fungerer entreprenørens egenkontroll for det utførte arbeidet med bilder og sjekklister. Det ble observert på befaringa. På Væla var det ikke arbeid under befaringa og det er derfor ikke grunnlag for å si noe om hva som ble gjort der..

4 Friksjonsforsøk

4.1 Motivasjon

Basert på målingene til Bossel og Haugen (2013) og studering av enkelte tekniske planer, fremstår det som at bransjen er noe konservativ i valg av friksjonsfaktor ved beregning av rørstabilitet. I rørberegningene på Sundli kraftverk brukes det en friksjonsfaktor $\mu=0,25$, på Tverråne og Nybuelve $\mu=0,5$ mens Bossel og Haugen (2013) fant at denne faktoren kunne settes til 0,62 under komprimerte forhold for GRP. Basert på samtaler med bransjeaktører synes $\mu=0,5$ å være et standardtall som legges til grunn ved beregning uavhengig av hvilke rørtype som brukes og hvilke omfyllingsmasse som velges.

Utviklinga i hvilke type omfyllingsmasse som brukes, går mot en stadig større andel masser med finstoffinnhold. På Væla kraftverk og Tverråne og Nybuelve kraftverk brukes det hhv 0-8 mm og 0-60 mm sorterte morenemasser uten krav til andel nullstoff i massene. I flere tilfeller synes den sorterte massen som kjøres inn å ligne veldig på den massen som er gravd opp av grøfta og som finnes naturlig i grus- og morenerygger i tilknytning til grøftetraseen.

Basert på disse observasjonene burde det miljømessig og økonomisk være grunnlag for å vurdere økt bruk av stedlige masser til omfylling av nedgravde rørgater. Det synes også som det er behov for bedre data på hvilke friksjonsfaktorer som kan legges til grunn.

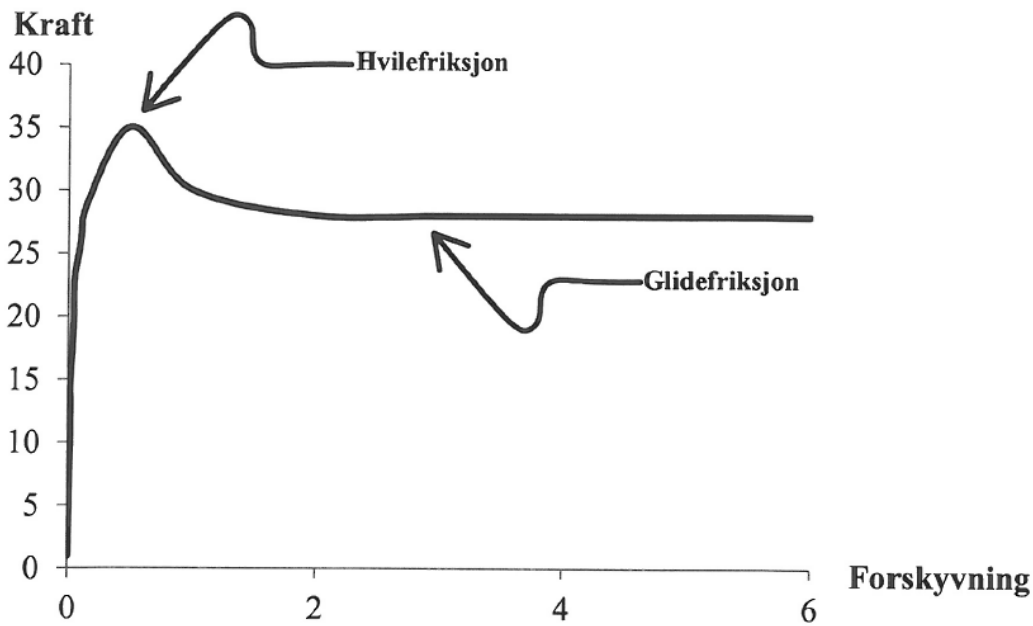
4.2 Friksjon og friksjonsfaktor

Det skilles mellom statisk friksjon og glidefriksjon. Statisk friksjon vil si motstand mot glidning mellom to flater som berører hverandre uten at de beveger seg i forhold til hverandre. Den statiske friksjonens maksimale verdi F angis som den andel av normalkraften N som opptrer like før de to flatene begynner å bevege seg i forhold til hverandre. Forholdet mellom F og N kalles friksjonsfaktor μ . μ er gitt ved:

$$\mu = \frac{F}{N}$$

Glidefriksjon er motstanden mot glidning mellom to materialflater som glir mot hverandre. Friksjonsfaktoren μ angir forholdet mellom normalkraften N mellom de to flatene og trekraften F som skal til for at de glir mot hverandre med en hvis hastighet. μ varierer med hastigheten mellom de to flatene slik at høyere hastighet gir lavere μ . (Ormestad, 2009)

I forsøkene er hele forløpet logget fra 0 trekraft i sylindere opp til at prøven beveger seg med jevn hastighet. Dermed måles både statisk friksjon før bevegelsen starter og glidefriksjon mens jordprøvene glir mot røret. Figur 30 viser et eksempel på en kraft-forskyvningskurve der kraftforskjellen mellom hvilefriksjon og glidefriksjon er illustrert.



Figur 4-30: Eksempel på kraft-forskyvningsdiagram (Bossel og Haugen 2013)

4.3 Materialer

4.3.1 Friksjonsjordartene brukt i forsøkene

Under befaringene nevnt i kapittel 3 ble det tatt til sammen 9 prøver av omfyllingsmasser og stedlige masser. I tillegg er det tatt inn to prøver som skal representere stedlige friksjonsjordarter. To pukkeprøver og tre prøver av stedlig masse er testet på alle de tre rørtypene som ble brukt i forsøkene. Ytterligere to omfyllingsmasser er tatt med i forsøkene gjort mot GRP-rør.

Prøvene nummereres M for masse og gis et nummer. C_u er graderingstallet d_{60}/d_{10} der d er korndiameter og 60 og 10 står for vektprosent med diameter mindre enn d .

Følgende prøver er samla inn (beskrivelser etter Emdal, 2009)

Betegnel- gelse	Fra	Type/hentested	Beskrivelse	Merknader
M1	Tverråne kraftverk	Stedlig masse fra grøftekant ca 200 meter opp for kraftstasjonen	Sandig grus 42% sand, 58% grus $C_u = 12$: middels gradert	Brukt i forsøk GRP
M2	Tverråne kraftverk	Stedlig masse fra grøftekant ca 250 meter opp fra kraftstasjonen	Sandig grusig 55% sand, 45% grus $C_u = 13$: middels gradert	Brukt i forsøk GRP og duktile
M3	Nybuelve kraftverk	0-60 mm natur, omfyllingsmasse fra øvre halvdel av røret, henta fra grøfta ca 350 meter opp for kraftstasjonen	Sandig grus 43% sand, 57% grus $C_u = 11$: Middels gradert	Brukt i forsøk GRP
M4	Ekle grustak	Naturmasser, representativ masse for sand/grusrygger der det bygges kraftverk, tatt fra skråning.	Sandig grus 44% sand, 56% grus $C_u = 22$: vellgradert	Brukt i forsøk GRP og duktile
M5	Sorteringsanlegg Kroon Maskin	Sandig, grusig, svart jord med noe humusinnhold, representativ for jord fra humuslaget	Sandig grusig 45% sand, 55% grus $C_u = 12$: middels gradert	Brukt i forsøk GRP og duktile
M6	Sundli kraftverk	8-16 mm skarpkantet knust pukkk til bæresona, henta fra grøftetråsen	90% Middels grus $C_u = 1$: ensgradert	Brukt i forsøk GRP og duktile
M7	Tverråne kraftverk	16-22 mm delvis knust naturpukk, henta fra grøftetråsen	40% grov grus, 60% middels grus $C_u = 1$: ensgradert	Brukt i forsøk GRP og duktile
M8	Tverråne kraftverk	0-60 mm naturmasse, omfyllingsmasse fra øvre halvdel av røret, henta fra grøft	Sandig grus 44% sand, 56 % grus $C_u = 24$: vellgradert	Er lik som Nybuelve kraftverk
M9	Væla kraftverk	0-8 mm sortert morenemasse Omfylling topp rør, henta fra grøft	54% sand, 46% grus $C_u = 13$: middels gradert	
M10	Væla kraftverk	8-22 mm pukkk, henta fra grøft	90% middels grov grus $C_u = 2$: Ensgradert	
M11	Sundli kraftverk	0-16 mm knust masse brukt på toppen av røret, henta fra grøft	Sandig grus 27% sand, 63% grus $C_u = 36$: vellgradert	

Tabell 10: Masseprøver til bruk i friksjonsforsøk

Prøvene er kjørt i siktemaskina på vassdragsteknisk laboratorium ved NTNU. Maskina er en vibratormaskin med 5 minutter gangtid. Hver prøve er registrert i et materialprøveskjema som inneholder data fra sikting og kornfordelingskurve. Disse ligger ved som vedlegg 2.

Figurene 31 til 36 viser bilder av de massene som er mest brukt i forsøkene og hvor de er hentet. Prøve M1 er hentet fra området vist i figur 31. Figur __ viser kornfordelingskurvene til de middels og vellgraderte prøvene. Figur __ viser kornfordelingskurvene til de ensgraderte massene (pukk). Prøvene M3 og M4 er veldig like M8 og for å gi bedre oversikt er bare M8 tegnet inn.



Figur 31: Masseprøver henta fra Nybuelve kraftverk



Figur 32: Område stedlig masseprøve fra Tverråga er tatt



Figur 33: De fem masseprøvene brukt på GRP og duktile rør. Øverst fra venstre: M7, M1, og M6. Nederst fra venstre: M5 og M4



Figur 35: Masseprøve M5



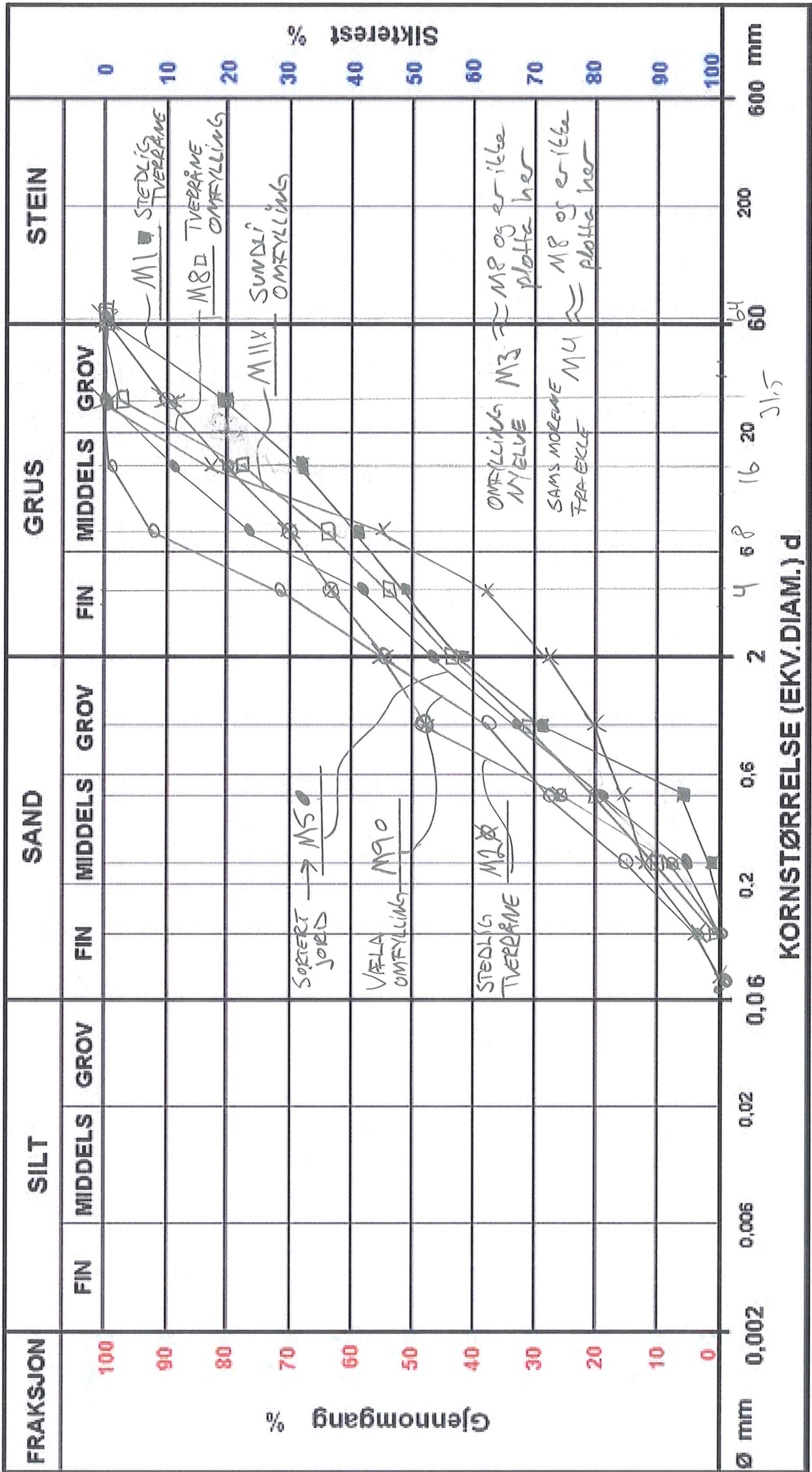
Figur 34: Masseprøve M1



Figur 37: Masseprøve M4



Figur 36: Hentested M4, Ekle Grustak AS, Trondheim



4.3.2 Rørmaterialet

Det er brukt tre typer rør i forsøkene, men bare to av de er presentert i denne rapporten:

- ett DN 500 duktilt støpejernsrør med utvendig bitumenbelegg. Røret er produsert av PAM/Saint-Gobain og forhandles i Norge av Brødrene Dahl. Røret har ligget ute eksponert for vær og vind i ca 4-5 år i Dale i Sunnfjord. (figur 40)
- ett DN 500 PN 6 GRP rør produsert av Flowtite. Røret var en del av leveransen til forsøkene til Bergsaker og Baargaard (2012) og har ligget ute i Ekle Sandtak i Trondheim i ca 3 år. Se figur 42.



Figur 40: Duktilt støpejernsrør med sink/bitumen ytterkappe



Figur 41: GRP rør

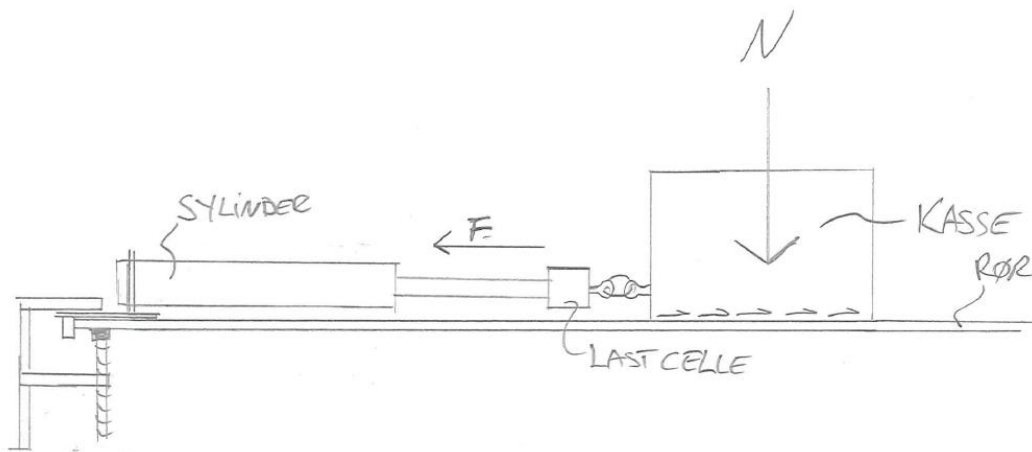
4.4 Metode og oppsett

4.1.1 Utstyr

Forsøkene gjennomføres ved at en kasse av vannfast kryssfiner som er formskåret til \varnothing 500 mm rør, fylles med en jordprøve og trekkes av en sylinder langs overflaten på et rør. Kraften sylindere trekker med måles av en lastcelle og logges av et dataprogram. Hastigheten sylindere trekker med kan reguleres trinnløst ved å styre spenningen på motoren. Materialprøven, plate, lodd og kassen veies og summen av disse utgjør normalkraften N mot røret. Kraften sylindere trekker med angir trekkraften F som skal til for at de to flatene skal gli i forhold til hverandre. Forholdet mellom normalkraften og trekkraften er friksjonsfaktoren.

Figur 42 viser en prinsippskisse. Stålplata som sylindere er montert i, har to påsveisede bolter som stikker ut på nedsiden av plata. Platen plasseres oppå røret slik at de to boltene butter imot rørenden, og festes med tvinge. Innfestinga på sylindere tres ned på bolten på innfestinga. I enden av sylindere stikker det ut et gjengestag som lastcella skrues på. I enden av lastcella er det et en øyebolt som passer akkurat til låsepinnen til en 8 mm sjakkell.

Selve kassa er laga av 22mm vannfast kryssfiner og skrudd sammen. Gjennom kassa går det et M10 gjengestag som sikrer av trekkraften når helt fra til bakveggen på kassa slik at det er trekk i både frontvegg og endevegg i kassa. I enden av gjengestaget er det skrudd på en øyebolt. Det tres en sjakkell gjennom øyebolten og låsepinnen i sjakkellen gir innfesting i lastcella. Oppsettet er konstruert slik at det skal oppføre seg «uendelig stivt» i forhold til de kreftene som skal måles. Kassa har innvendig lengde 29,9 mm og bredde 19,8 mm.



Figur 42: Prinsipptegning for forsøkene

Forsøkene ble gjennomført over to omganger på to forskjellige steder. Første runde ble gjennomført på duktile støpejernsrør med utvendig fiberarmert sementmørtel og utvendig sink/bitumen-coating hos Brødrene Dahl på Dale i Sunnfjord. Rørene brukes vanligvis til å trene montører i montasje av rør. Figur 43 til 45 viser oppsettet slik det ble brukt på Dale for massene M2, M4, M5, M6 og M7.



Figur 44: sylinder og kasse montert på sink/bitumenrør



Figur 43: Loggeutstyret, lastcelle og kalibrering med 1,0 og 2,0 kg lodd



Figur 45: Sylinder og kasse montert på sementmørtelbetong-rør

Andre runde ble gjennomført i vassdragslaboratoriet ved NTNU på GRP-rør. Figur 47 viser hvordan det var montert opp. Det er det samme utstyret som ble brukt begge steder med samme oppsett, men i vassdragslaboratoriet ble i tillegg kassens forflytning målt og logga separat med en egen avstandsmåler. Dette ble ikke gjort på de duktile røra på Dale. Derfor kan det lages kraft-forskyvningsdiagram over forsøkene på GRP, men ikke på duktile rør.



Figur 46: t.v forsøk er gjennomført, bilde tatt før demontering. Legg merke til lodd og det tynne laget med finmasser som ligger igjen på røret. t.h:sylinder og kasse montert på GRP-rør.

4.1.2 Prosedyre for gjennomføring

Røroverflaten skal være ren og tørr før hvert forsøk starter. Før forsøkene startes på en ny plass eller en ny dag, kalibreres lastcella og dataloggeren ved med å bruke to lodd på hhv. 1 kg og 2 kg. Samme kalibrering ble gjennomført etter forsøkene med fiberarmert sementmørtel og GRP for å sjekke for evt. feil som har oppstått underveis.

Ett forsøk gjennomføres som følger:

1. Finérkassen plasseres midt på toppen på røret og sjakkelen festes til øyet på lastcella. Det kontrolleres at sylindere og senter av kassen er midt på røret så det ikke oppstår skeivtrekk og kassen går mot en av sidene.
2. Prøvematerialet veies opp: 2 x 4800 g, i sum 9600 g og helles i kassen. Toppen av overflaten jevnes ut så det blir flatt og en plate i kryssfiner legges oppå massen.
3. Prøven komprimeres så ved at ett 20 kg lodd settes på plata oppi kassa, løftes 1,5-2,5 cm og slippes 3-4 ganger. Dette for å imitere noe av den komprimeringa som skjer når grøfta fylles igjen med gravemaskin. Loddet blir stående på plata etter siste dunk.
4. Loggeprogrammet startes og motoren på sylindere startes. Spenninga reguleres gradvis opp til kraften er så stor at kassa begynner å bevege seg. Når prøven beveger seg holdes hastigheten relativt konstant. Prøven trekkes en lengde på 2,5-5 cm med hastighet 0,5-1,5 mm/s før motoren stoppes. Etter stopp reverseres motoren litt slik at lasten i lastcella blir 0.

5. Et nytt lodd på 20 kg settes opp det første 20 kg loddet. Det løftes 1,5-2,5 cm og slippes ned på det andre loddet 3-4 ganger. Dette for å konsolidere materialet igjen etter første test.
6. Motoren startes og spenningen skrues gradvis opp til prøven beveger seg. Prøven dras med en hastighet på 0,5-1,5 mm/s ca 2,5-5 cm før motoren igjen stoppes og reverseres for å få lasten ned på 0 igjen.
7. Et nytt 20 kg lodd settes opp de andre to, løftes 1,5-2,5 cm og slippes 3-4 ganger for å konsolidere prøva.
8. Motoren startes og spenningen skrues gradvis opp til prøven beveger seg. Prøven dras med en hastighet på 0,5-1,5 mm/s ca 2,5-5 cm før motoren igjen stoppes og reverseres for å få lasten ned på 0 igjen.
9. Kassen kobles fra lastcellen og prøvematerialet spas opp i en bøtte. Sylindere kjøres ut igjen til opprinnelig lengde og røroverflaten gjøres ren og tørr.

For hvert jordmateriale gjøres det samme forsøket tre ganger på samme rør. Det gir en serie. Totalt er det gjort 17 serier og 51 forsøk. Derfor omtales seriene i det videre. Dersom det skal vises til ett spesifikt forsøk vil det bli omtalt som 5. serie 3. forsøk. Tabell 11 viser en oversikt over seriene som ble kjørt. For serie 6 til 10 ble det problemer med behandling av datagrunnlaget og ikke tid nok til å få det med i rapporten.

Serie nr	Sted	Rørtype	Material-prøvenr	Beskrivelse
1	Dale	Ø500 Bitumen	M6	8-16 knust pukkk Sundli
2	Dale	Ø500 Bitumen	M2	Stedlig masse Tverråne
3	Dale	Ø500 Bitumen	M4	Naturmasser Ekle
4	Dale	Ø500 Bitumen	M5	Svart, sandig, grusig jord
5	Dale	Ø500 Bitumen	M7	16-22 mm pukkk Tverråne
6	Dale	Ø500 Sement	M6	8-16 knust pukkk Sundli
7	Dale	Ø500 Sement	M2	Stedlig masse Tverråne
8	Dale	Ø500 Sement	M4	Naturmasser Ekle
9	Dale	Ø500 Sement	M5	Svart, sandig, grusig jord
10	Dale	Ø500 Sement	M7	16-22 mm pukkk Tverråne
11	NTNU	Ø500 GRP	M6	8-16 knust pukkk Sundli
12	NTNU	Ø500 GRP	M2	Stedlig masse Tverråne
13	NTNU	Ø500 GRP	M4	Naturmasser Ekle
14	NTNU	Ø500 GRP	M5	Svart, sandig, grusig jord
15	NTNU	Ø500 GRP	M7	16-22 mm pukkk Tverråne
16	NTNU	Ø500 GRP	M3	0-60 mm natur Nybuelve
17	NTNU	Ø500 GRP	M1	Stedlig masse Tverråne

Tabell 11: Oversikt over gjennomførte forøksserier med jordmaterialer

4.5 Resultat

Lastcellen gir ut et 0-10 V signal som logges. Dette er kalibrert slik at 0,2 V endring er 1 kg trekkraft. Vekta av materialprøven, kassen, finerplata oppi kassa og lodda summeres og blir normalkraft. Forholdet mellom trekkraft målt av lastcella og normalkraft presenteres her som friksjonsfaktor.

Formen på dataene gjør det vanskelig å presentere friksjonsfaktoren i de tre forsøkene i hver serie i samme graf. På grunn av plass er det heller ikke formålstjenlig å vise alle 51 enkeltgrafer på målt friksjonsfaktor. Derfor samles dataene for største statiske friksjonsfaktor for hvert forsøk og disse presenteres her i tabell og graf. Medianverdien pr jordart fra de tre forsøkene er også satt opp.

I vedlegg 3 ligger det ved ett datablad pr forsøk med grafer som viser utregnet friksjonsfaktor μ , avlest spenning fra lastcelle [V] og kraft-forflytningsdiagram for forsøkene gjort på GRP.

For å sammenligne materialenes friksjonsegenskaper i forhold til hverandre kan grafen for avlest spenning fra lastcella brukes direkte ettersom alle forsøkene er gjort med 9600 gram prøvemateriale og samme kalibrering av spenningen fra lastcella.

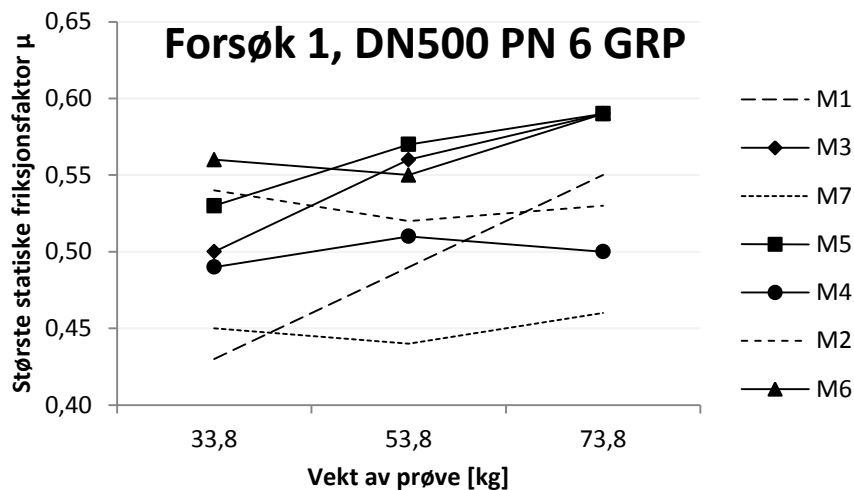
4.5.1 DN 500 PN6 GRP med 7 masseprøver

Tabell 12 viser største målte statiske friksjonsfaktor fra forsøkene med GRP. Tallene er manuelt avlest fra grafene for friksjonsfaktor og satt inn i tabellen. Figurene 48 til 51 viser de samme resultatene grafisk.

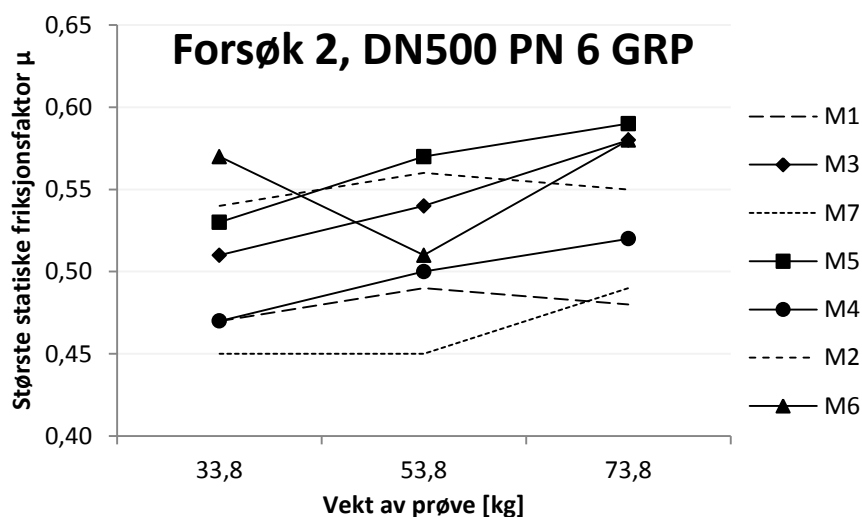
Tabell 12: Største målte statiske friksjonsfaktor målt på DN500 PN6 GRP

Forsøk nr			1			2			3			Median		
Serie	Jordart	kg	33,8	53,8	73,8	33,8	53,8	73,8	33,8	53,8	73,8	33,8	53,8	73,8
17	M1		0,43	0,49	0,55	0,47	0,49	0,48	0,48	0,53	0,58	0,47	0,49	0,55
16	M3		0,50	0,56	0,59	0,51	0,54	0,58	0,51	0,54	0,57	0,51	0,56	0,58
15	M7		0,45	0,44	0,46	0,45	0,45	0,49	0,46	0,44	0,40	0,45	0,44	0,46
14	M5		0,53	0,57	0,59	0,53	0,57	0,59	0,56	0,58	0,60	0,53	0,57	0,59
13	M4		0,49	0,51	0,50	0,47	0,50	0,52	0,50	0,49	0,50	0,49	0,50	0,50
12	M2		0,54	0,52	0,53	0,54	0,56	0,55	0,56	0,54	0,53	0,54	0,54	0,53
11	M6		0,56	0,55	0,59	0,57	0,51	0,58	0,51	0,52	0,58	0,56	0,52	0,58

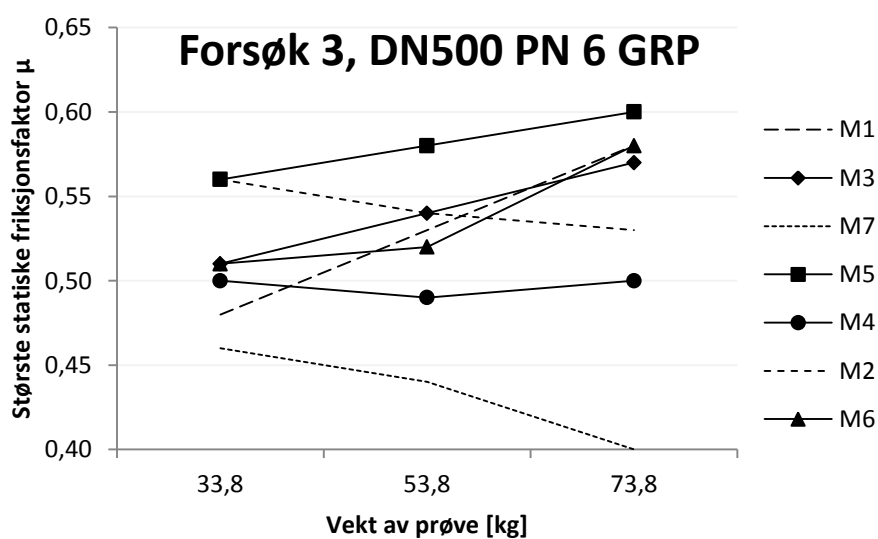
M6 = 8-16 knust pukk, M2 = stedlig Tverråne, M4 = Naturmasser Ekle, M5 = svart, sandig jord, M7 = 16-22 delvis knust naturpukk Tverråne, M3=0-60mm Nybuelve, M1 stedlig masse Tverråne



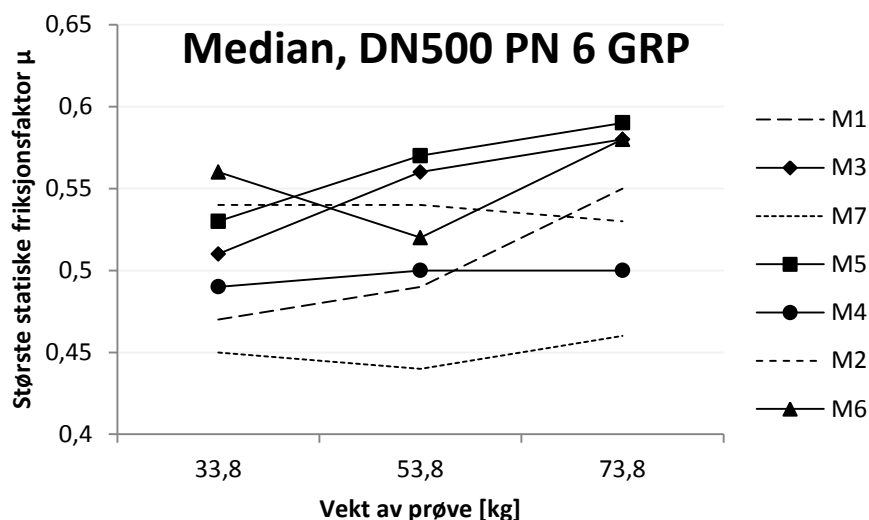
Figur 47: Største statiske friksjonsfaktor for forsøk 1 i hver serie



Figur 48: Største statiske friksjonsfaktor for forsøk 2 i hver serie



Figur 49: Største statiske friksjonsfaktor for forsøk 3 i hver serie



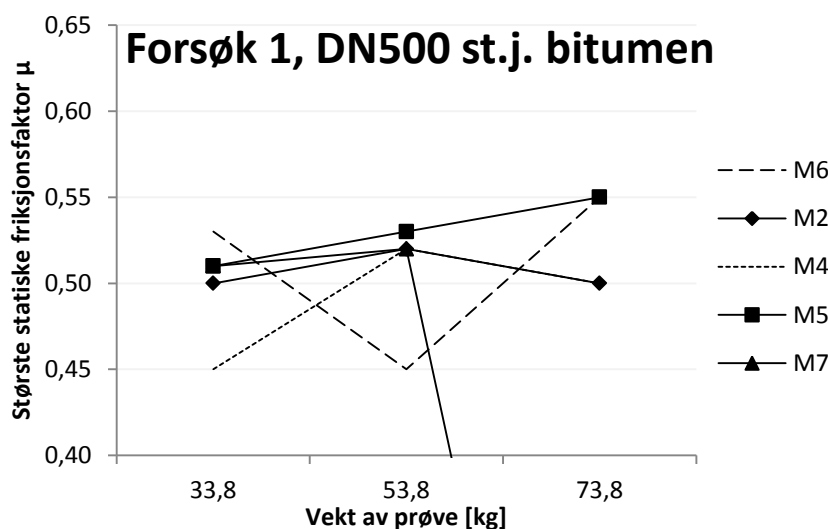
Figur 50: Største statistiske friksjonsfaktor, median av målt verdi for forsøk 1 til 3 i hver serie

4.5.2 DN500 duktile støpejernsrør med sink/bitumen

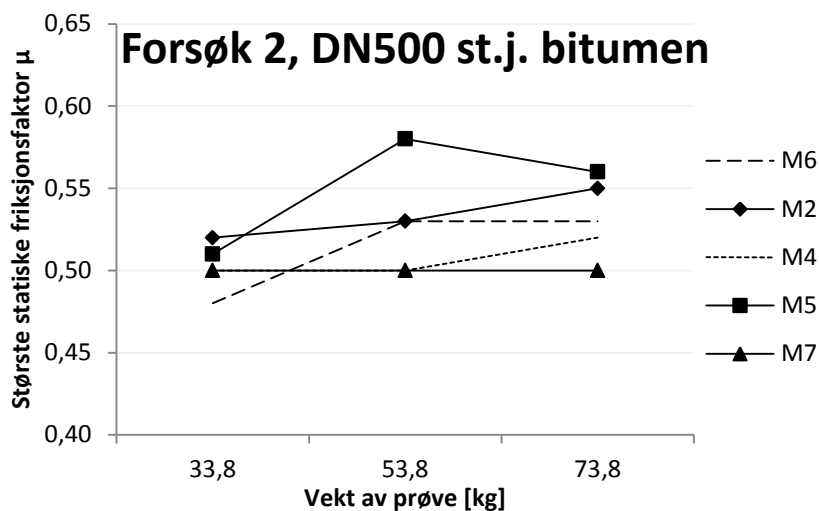
Tabell 13 viser største målte statistiske friksjonsfaktor fra forsøkene med GRP. Tallene er manuelt avlest fra grafene for friksjonsfaktor og satt inn i tabellen. Figurene 52 til 55 viser de samme resultatene grafisk.

Tabell 13: Største målte statistiske friksjonsfaktor på DN500 duktile støpejernsrør m/ sink/bitumen ytterkappe. M6 = 8-16 knust puk, M2 = stedlig Tverråne, M4 = Naturmasser Ekle, M5 = svart, sandig jord, M7 = 16-22 delvis knust naturpukk Tverråne

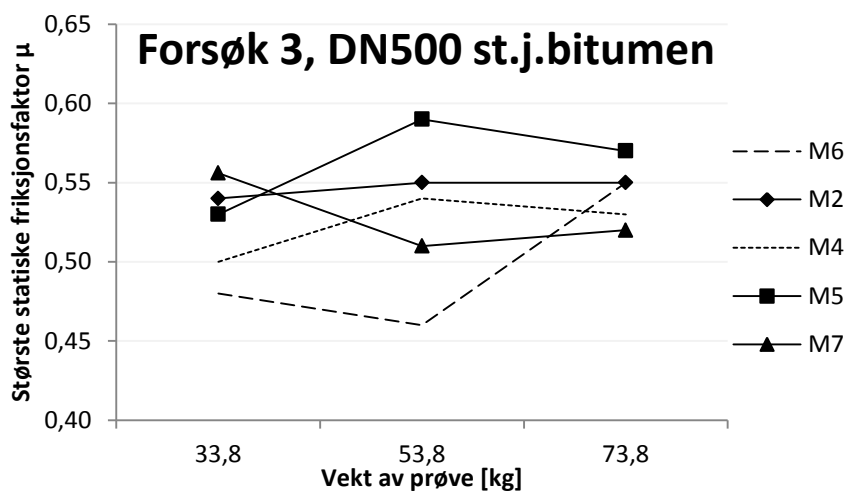
Forsøk nr		1			2			3			Median			
Serie	Jordart	kg	33,8	53,8	73,8	33,8	53,8	73,8	33,8	53,8	73,8	33,8	53,8	73,8
1	M6		0,53	0,45	0,55	0,48	0,53	0,53	0,48	0,46	0,55	0,48	0,46	0,55
2	M2		0,50	0,52	0,50	0,52	0,53	0,55	0,54	0,55	0,55	0,52	0,53	0,55
3	M4		0,45	0,52	0,50	0,50	0,50	0,52	0,50	0,54	0,53	0,5	0,52	0,52
4	M5		0,51	0,53	0,55	0,51	0,58	0,56	0,53	0,59	0,57	0,51	0,58	0,56
5	M7		0,51	0,52	0,00	0,50	0,50	0,50	0,56	0,51	0,52	0,51	0,51	0,51



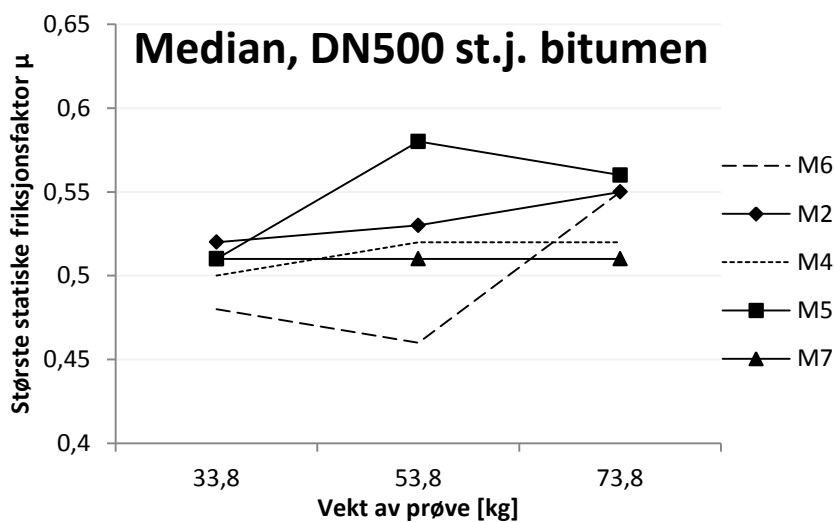
Figur 51: Største statistiske friksjonsfaktor for forsøk 1 i hver serie



Figur 52: Største statistiske friksjonsfaktor for forsøk 2 i hver serie



Figur 53: Største statistiske friksjonsfaktor for forsøk 3 i hver serie



Figur 54: Største statistiske friksjonsfaktor for median av målt verdi for forsøk 1 til 3 i hver serie

4.6 Diskusjon

4.6.1 Usikkerhetsfaktorer

I samråd med professor i geoteknikk ved NTNU, Gudmund Eiksund, er det vurdert som riktig at massene som brukes i friksjonsforsøkene ikke er tørket på forhånd men er jordfuktige. Dette fordi jorden aldri vil være helt tørr nede på det nivået som rørgatene graves.

Ved sluttkalibrering av lastcella etter forsøkene gjort på GRP-røret ved NTNU, ble det diskutert at lastcella ikke viste helt null når den ikke var belasta, men lå med en spenning på 0,04-0,08 V i ubelasta tilstand. Den var i utgangspunktet kalibrert til 0 i ubelasta tilstand. Ved gjennomgang av dataseriene fra forsøkene gjort i Dale og ved NTNU er det mange av forsøkene der lastcella ligger med en spenning på 0,01 til 0,07 V før den belastes.

Før forsøksseriene starta på GRP-røra ved NTNU og de duktile røra i Dale, var lastcella kalibrert slik at 0,2 V endring i spenning er 1,0 kg. Ved bruk av lodd på 1,0 og 2,0 kg ble det kontrollert at dette fortsatt stemte før og etter og at forsøkene på GRP-rør og det duktile røret med sementbelegg ble gjort. Det ble også kontrollert før forsøket med det duktile røret med bitumenbelegg. Dermed ser det ut som det bare er 0-punktet som har flyttet seg litt når lastcella er montert på sylindren. Feilen utgjør i str. orden 0,2-0,4 kg. Dvs lite i forhold til at trekkrafta i sylindren varierer mellom 20 og 45 kg ved måling av friksjonsmotstanden.

Kassa hviler i utgangspunktet på røret når massene fylles i. Det har vært vurdert å prøve å kvantifisere friksjonen mellom kassa og røroverflaten, men etter at det er gjennomført en del forsøk synes det veldig vanskelig å finne et relevant tall på hva denne friksjonen utgjør og om den virker inn med noe relevant størrelse i det hele tatt. Det er to grunner til det. For det første er det bare de formskjærte endeveggene som hviler på kassa og gir friksjon. Langveggene er skåret slik at det kun er hjørnet på plata som kan komme inntil røret og bidraget fra



Figur 55:Kasse mot rør med sementmørtelbetong

langveggen kan sees bort ifra. Se figur 56. Det andre er at selv om kassas innfesting på lastcella er satt så lavt som mulig, gir trekkraften en liten momentvirkning på kassa som fører til at bakenden glir litt opp med ulik høyde fra forsøk til forsøk. Dermed er det som regel ikke noe friksjonsbidrag fra bakveggen. Eksempel på dette er vist i figur 57. Mot GRP og bitumen

er friksjonsmotstanden for trekassa ganske liten i seg selv, selv om den ikke er målt direkte. Mot betongen er overflata noe mer ru, men momentvirkningen av oppløft på bakveggen større. Det vurderes derfor slik at friksjon pga kassa har neglesjebare virkninger i forhold til de størrelsene det måles på.



Figur 56: Oppløft av kasse på grunn av momentkrefter fra trekkraften i sylindren

Alle de tre rørene som er brukt i forsøkene er ikke nye fra fabrikk, men har ligget ute noen år utsatt for vær og vind. Hovedmålet med forsøkene er å vurdere egenskapene til omfyllingsmassene i forhold til hverandre. Dette for å se om stedlige masser kan ha like gode egenskaper som de massene som kjøpes og tilkjøres. Da spiller det ingen rolle om rørene er gamle eller nye, for forholdene for hver masseprøve blir uansett like.

Det at forsøkene gjennomføres skaper mye data på friksjonsfaktorer for ulike masser. På GRP og bitumen-rørene har neppe alderen så mye å si basert på hvordan rørene ser ut. Bitumen-røret har få tegn til slitasje fra vær og vind sammenlignet med et nytt. GRP-røret er noe solbleket, men overflaten kjennes lik ut som på et nytt rør når den tas på. Friksjonsfaktorene som er funnet i disse forsøkene bør ha god gyldighet for de to rørtypene. Den fiberarmerte sementbetong-ytterkappen har nok blitt noe mer ru siden et blått malingsaktig lag er så å si borte. Dermed kan det tenkes at de målte friksjonsfaktorene er litt høyere enn de ville vært med et nytt rør.

Det er en svakhet at målingene av kassens bevegelse på GRP har så dårlig kvalitet. Det er derfor gjort en skjønnsvurdering uifra grafene på hva som er største statiske friksjonsfaktor. Senere forsøk må ha en bedre måling av forflytning slik at eksakt friksjonsfaktor for brudd kan måles. Når det er sagt er det svært få av prøvene som viser tydelig forskjell på statisk friksjon og glidefriksjon. Det er svært få av grafene som har den karakteristiske formen med tydelig større spenning i bevegelsen starter.

4.6.2 Sammenligning av jordprøver

Det går tydelig fram av grafene for GRP at grov naturpukk kommer dårligst ut (M7) med noe avstand opp til neste som er M4 naturmaser Ekle og M1 stedlig masser Tverråne. Best ut kommer M5 svart, sandig, grusig jord og M3 0-60 mm omfylling Nybuelve. For duktile rør med bitumenoverflate er kommer M6 knust pukk dårligst ut og M5 svart, sandig jord best ut.

De målte verdiene av friksjonskoeffisient ligger noe lavere enn forventa. Medianverdiene viser tydelig at friksjonsfaktoren øker med økende vekt på prøva. Sammenlignet med forhold i felt er trolig friksjonsfaktoren målt med størst vekt på prøven den som er mest representativ. Mot GRP viser disse verdiene en spredning i målte friksjonsfaktorer fra 0,50 til 0,59, sett bort fra M7 grov naturpukk. Mot duktile rør med bitumen ytterkappe ligger verdiene i hovedsak mellom 0,5 og 0,55.

Basert på de målte verdiene har stedlige masser minst like gode eller bedre friksjonssegenskaper mot rørene enn dagens praksis, basert på at M7 grov naturpukk og M6 8-16 knust pukk, er standard vare som brukes til omfylling av rør.

5 Forøk med polyuretan – skum

5.1 Bakgrunn

Det nederlandske selskapet Penstock BV v/Guy Harris har utviklet en patentert metode for å bruke polyuretanskum (PU-skum) som omfylling rundt nedgravde rørgater i stedet for dagens praksis med pukk og sorterte masser. Utviklingen er gjort i samarbeid med det norske småkraftselskapet Odelskraft AS og det tyske selskapet Covestro AG (tidligere Bayer MaterialScience). Penstock BV får innvilget nederlandsk patent på sin metode for bruk av PU-skum til omfylling i januar 2016. Odelskraft og Penstock har ønsket å teste og ta i bruk metoden på norske småkraftverk.

Odelskraft skal i gang med bygging av Tjaldalsåni kraftverk i Q2 2016 med Ø 1400 mm GRP-rørgate i klasse 0, og ønsker å bruke PU-skum på deler av denne rørgata. De har henvendt seg til NVE for å få lov til dette og konsulenter har satt i gang med arbeidet med teknisk plan.

Ihht NVEs retningslinjer for rør, luker og tappeorganer skal stabilitetsberegningene utføres etter «anerkjente beregningsmodeller» og det skal brukes «velgraderte omfyllingsmasser» rundt rørene. NVE har derfor pekt på NTNU og Norsk Vannkraftsenter (NVKS) som et forskningsmiljø som kan sammenligne omfylling med PU-skum med dagens metode med bruk av pukk og sorterte masser. Det er ønskelig med modellforsøk som kan angi hvilke materialparametere som kan legges til grunn ved beregning.

5.1.1 NTNUs oppdrag

Penstock BV henvendte seg våren 2015 til NTNU og NVKS, som tok på seg å gjøre noen enkle verifikasjonstester for å sammenligne egenskapene til ei rørgate nedgravd med tradisjonell metode og ei rørgate med PU-skum som omfylling. Arbeidet gjennomføres innafor ramma av ei mastergradsoppgave og består av følgende forsøk:

- Måling av strekkfasthet PU-skum
- Måling av trykkfasthet PU-skum
- Måling motstand mot glidning i sjiktet PU-skum – pukk/grus
- Måling av motstand mot glidning i sjiktet GRP-rør – pukk

Forsøkene gjennomføres på materialteknisk laboratorium ved NTNU og oppsettet er utviklet i samarbeid med førsteamanuensis Arne Aalberg fra institutt for konstruksjonsteknikk og professor Leif Lia fra institutt for vann- og miljøteknikk.

Det er en forutsetning fra NTNU og NVKS sin side at resultatene fra forsøkene kan gjøres allment tilgjengelig gjennom masteroppgaven og evt. delrapporter.

5.2 Gjeldende regler og standarder

5.2.1 Damsikkerhetsforskriften og NVEs retningslinje

Relevante krav som gjelder omfyllingen rundt nedgravde rør ihht damsikkerhetsforskriften §5-15 og NVEs retningslinje for stenge- og tappeorganer, rør og tappeorganer, er gitt i punkt 2.2.

Oppsumert er de viktigste kravene en metode med bruk av polyuretanskum må tilfredsstill:

- glidestabilitet i hellende terreng
- motstand mot oppdrift
- opptak av horisontale og vertikale krefter på grunn av trykk og avvinkling i rørmuffer

5.2.2 Krav til fjernvarmerør ihht NS-EN 253:2009+ A1:2013

Fjernvarmebransjen bruker PU-skum til isolering mellom stålrør og en utvendig mantling av polyetylen. En av leggemetodene for fjernvarmerør heter høyaksiale spenninger. Den går ut på å legge rørene i grøfta kalde, montere de sammen og fylle over med masser. Så fylles de opp med varmtvann og temperaturen kan øke med str. orden 100-150 grader celsius. Det fører til at stålrørene utvider seg. Det gir skjærkrefter i fugen mellom PU-skum og stålrør og PU-skummet holder igjen utvidelsen ved å transportere disse kreftene ut til ytterkappa av PE. Røret vil nå bevege seg i enden av rørstrekket der man har montert inn bend, mens det i resten av røret vil bygge seg opp spenninger og stålets ekspansjon forhindres av jordfriksjon. Dette betyr at PU-skummet overfører skjærkrefter fra stålrøret til PE-yterkappa og videre ut i omfyllingsmassen. En stålspenning på 300 N/mm^2 er dimensjonerende for hvor lange rette strekk som tillates mellom bend (Brugg Pipesystems)

Trykk- og skjærstyrke

NS-EN 253:2009 setter krav til trykkstyrke og overføring av skjærkrefter i PU-skum etter følgende punkt:

Punkt i standarden	Beskrivelse	Krav
4.4.3	Krav til trykkstyrke ved 10% relativ deformasjon. Testes etter ISO 844. Resultatet skal gis som gjennomsnitt av 3 prøver. Størrelsen på prøvestykket skal være 30 mm x 30 mm x største høyde som kan skjæres ut av isolasjonen i fjernvarmerøret, men maks 20 mm.	> 0,3 MPa i radiell retning (dvs trykkretning normalt på røraksen)
4.5.5.2	Krav til aksial skjærstyrke i et ferdig produsert fjernvarmerør. Testoppsett slik at stålrøret påføres aksielle krefter mens ytterkappen i PE holdes fast. Det betyr i praksis krav til heft og skjærstyrke av PU-skummet i aksial retning.	Ved 23 °C: τ minst 0,12 MPa
4.5.5.2	Krav til tangentiell skjærstyrke i ferdig produsert fjernvarmerør. Testoppsettet er slik at stålrøret holdes fast mens ytterkappa roteres tangentielt til røraksen. Skummet overfører skjærkrefter som påføres på ytterkappa til stålrøret som holdes fast.	Ved 23 °C: minst 0,2 MPa

Disse kravene har relevans fordi PU-skummet i et fjernvarmerør har den samme oppgaven som PU-skum rundt ei rørgate; det skal overføre skjærkrefter som setes opp av inner-røret til ytterkappa/omfyllinga av jord. Det betyr at skjærstyrken i skummet har spesielt stor relevans. Tallene viser og at det er litt ulike krav til skjærstyrke avhengig av om røret belastes aksialt eller om det påføres torsjonskrefter tangentielt.

Levetid

Standarden bruker begrepet «expected thermal life» der thermal life defineres som tida som går før den tangentielle skjærstyrken ved 140 °C faller under 0,13 MPa ved kontinuerlig eksponering for aldringstemperaturen (driftstemperatur).

Punkt 4.5.5.1 sier at rørledningen skal ha en levetid på minst 30 år ved kontinuerlig driftstemperatur på 120 °C, minst 50 år ved kontinuerlig driftstemperatur på 115 °C og over 50 år ved en kontinuerlig driftstemperatur på 115 °C.

Dette punktet sier noe om forventet holdbarhet på styrken i PU-skum over tid og at lavere omgivelsestemperatur gir lengre levetid.

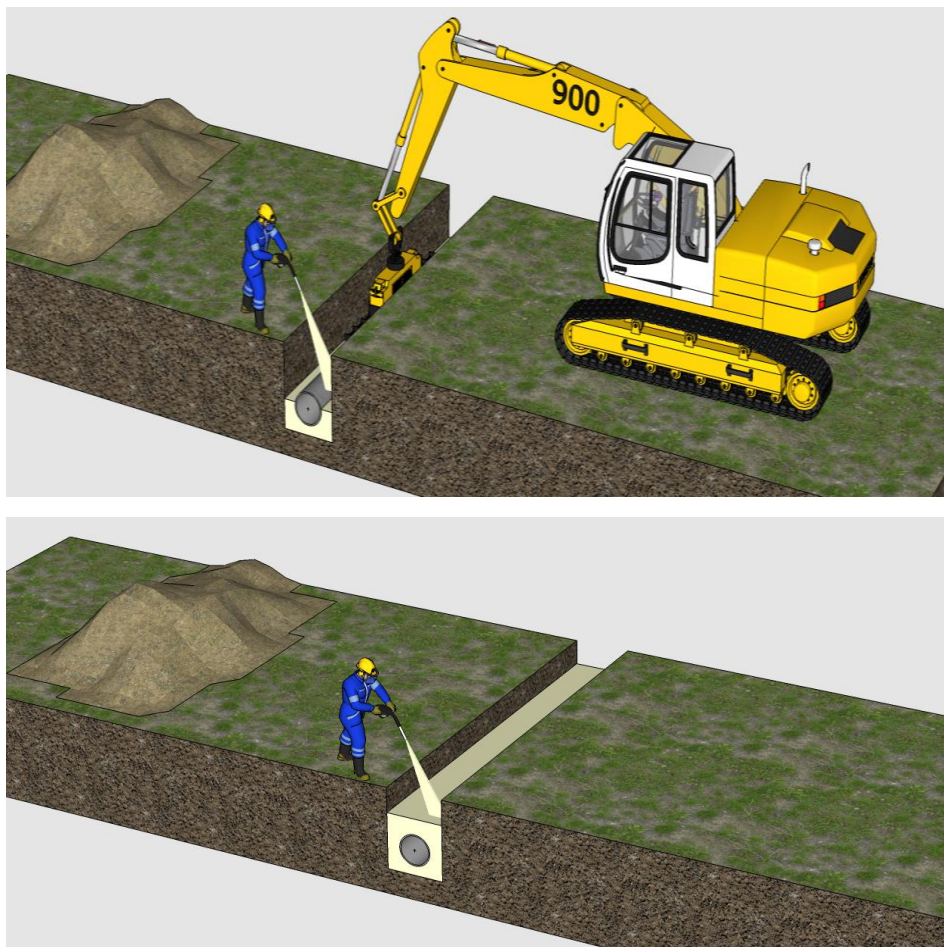
5.3 Leggemetode for rør med omfylling av PU-skum



Penstock/Odelskraft sin metode for installasjon av rør i grøfter baserer seg på at røret holdes i riktig posisjon av en maskin med sugekopper som står oppe på grøfttekanten. En annen maskin sprøyter så ut uherdet PU-blanding under røret og på sidene. Reaksjonstiden materialet bruker på å skumme opp kan styres og vil trolig settes til 1-4 minutt. Figur 58 viser manuell sprøyting av PU-skum mot rør under et forsøk i Mjøndalen våren 2015. Etter påføring starter PU-materialet herdeprosessen. Ureagert PU har gul farge og reagert PU- får en lysere gulfarge. Etter ca 10 minutter har PU-skummet oppnådd stor nok tidligfasthet til at sugekoppene kan kobles av og det kontrolleres at røret ligger i riktig posisjon. Deretter sprøytes det på et nytt lag uherdet PU-blanding som

Figur 57: Påføring av PU, forsøk Mjøndalen. (Foto: Penstock BV)

skummer opp til riktig tykkelse over røret og herder.



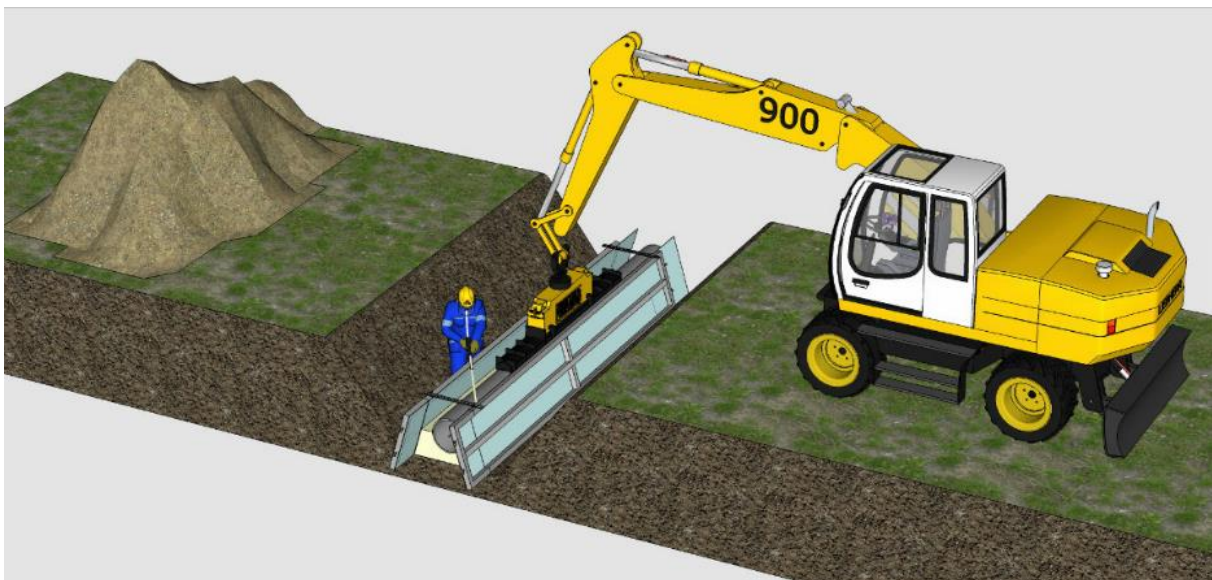
Figur 58: Installasjon av PU rundt rør. Øvre bilde viser maskin som holder rør i riktig posisjon og 50% oppfylling med PU. Nedre viser påføring av øvre lag PU. Fylling mot grøftevegg (Penstock BV)

5.3.1 Sprøyting mot grøftekant

Der terrenget tillater graves grøftene med en slik form og nøyaktighet at grøfteveggen brukes som «forskaling» for utlegging av skum. Dette gir sammenhengende kontakt i en herdeprosess mellom røret og kornene i grøfteveggen. Den langsgående formen på ytterflatene på underside og mot veggene vil få samme form og ujevnheter som jordoverflaten hadde ved påføring av skummet. De ytterste kornene i grøfteveggen vil limes fast. Prinsippet er vist i figur 59 på forrige side.

5.3.2 Sprøyting mot forskaling

I terrenget der grøfteformen blir for bred på grunn av gravedybde, jordtype eller andre forhold, kan det brukes plater av polyetylen (PE) som settes opp som «forskaling» langs røraksen for å lage ei form som skummet kan formes mot. PE som materiale hefter ikke mot PU-skum med mindre det behandles for det, derfor egner det seg godt som forskalingsplater. PE-platene fjernes etter herding og overflatens ruhet og form påvirkes i stor grad av hvor glatt og ordnet PE-platene monteres. Denne metoden gir bare fastliming av korn og ujevn form på undersiden, der det støpes mot bakken. Det kan påføres nytt, ureagert PU-materiale på overflaten av det herda PU-materialet ved tilbakefylling av jordmassene. Dette vil virke som et lim mellom eksisterende «glatte» PU-materiale og jordkornene som fylles tilbake. Kornenes heft avhenger av reaksjonstid på PU-skum og hvor lang tid det tar å tilbakefylle slik at kornene kommer i kontakt med det påførte PU-materialet før herdeprosessen har kommet så langt at det har dannet seg en hinne som ikke hefter mot kornene.

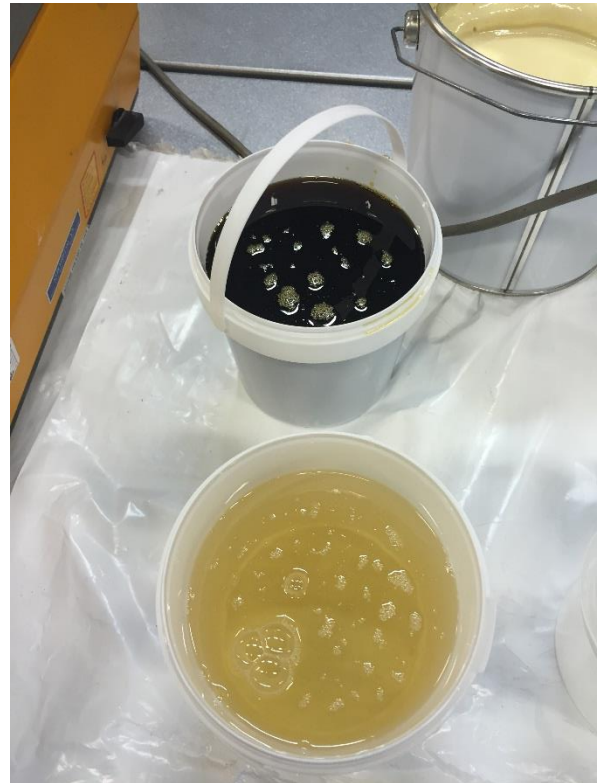


Figur 59: Bruk av forskaling til å forme PU-tverrsnittet (Penstock BV)

5.4 Materialelegenskaper

5.4.1 Polyuretanskum

Polyuretanskum (PU-skum) har mange bruksområder. Det spenner fra innpakkingsbeskyttelse og demping av støt og vibrasjoner til isolasjonsmateriale i bygninger, kjøleskap, frysebokser og rør. PU-skum produseres av to komponenter, polyol og isocyanat. Polyol er en lys veske og isocyanat, ofte referert til som MDI, er en mørk brun veske. Når disse blandes reagerer de med hverandre og luftfuktigheten/fukt i materialet de står i kontakt med. Gjennom en eksoterm prosess der det utvikles varme, dannes et skum som ekspanderer, fastner og herder. Hastigheten på reaksjonen er avhengig av temperatur. Jo høyere temperatur jo raskere reaksjon. Det finnes tilsetningsstoffer som kan akselerere reaksjons- og herdeprosessen dersom det er behov for en hurtigere reaksjon. Dette kan være spesielt viktig ved behov for



Figur 60: Polyol (lys) og isocyanat (mørk) klar til å veies opp før blanding

rask utvikling av styrke eller dersom laget som påføres blir tynt, ned mot 3-2 mm. Tynne lag utvikler ikke så mye varme som et tykkere lag og varmen kan bli absorbert av materialene i omgivelsene (f. eks steinkorn). Dette reduserer reaksjonshastigheten og er særlig relevant for utvikling av tidlig styrke i den delen av skummaterialet som trenger inn blant steinkornene i grøfteveggen. Reaksjonstid kan tilpasses ved bestilling til den installasjonsmetoden som brukes.

De to komponentene veies opp hver for seg og blandingsforholdet disse imellom, hvor godt de mikses og fritt volum tilgjengelig, avgjør romvekten på skummet. I forsøkene ble det brukt en drill med makshastighet på 3000 omdreininger pr minutt. Romvekten avgjør styrken på skummet slik at økt vekt gir økt styrke og varierer mellom 36 og 145 kg/m³.

Bruksområder

Det er blitt forsket på materialeegenskapene til PU-skum i over 50 år. Buzzi et al (2008) lister opp over 17 publikasjoner som er publisert på temaer som mekaniske egenskaper, isolasjonsevne, permeabilitet i materiale med åpne og lukkede celler og dannelsen av selve skummet og formen på cellene. PU-skum er et anisotrop materiale med noe variasjon i egenskapene avhengig av om det testes langsmed eller normalt på cellenes «rise-direction» (Buzzi et al. 2008).

I mer enn 25 år har PU-skum blitt brukt til injeksjon i bakken under eksisterende infrastruktur og bygninger for å korrigere setninger som har oppstått. Når skummet får ekspandere fritt er volumutvidelsen i str. orden 30 ganger det opprinnelige volum av ureagert materiale. Nede i bakken er det porevolumet som begrenser muligheten til ekspansjon. Når skummet ikke får

ekspandere fritt bygger det seg opp et trykk og det er effekten av dette trykket som korrigerer setninger. Skummet injiseres i små porsjoner helt til den ønskede effekten er oppnådd. Det er målt ekspansjonstrykk helt opp i 10 MPa ved injeksjon i bakken. Når skummet er på plass i bakken og har ekspandert og løfta fundamentet, regnes det som stabilt. Det bare er UV-stråler og enkelte flyktige løsemidler som aceton som bryter ned materialet og dette finnes normalt ikke i bakken. (Buzzi et al. 2008)

Styrkeegenskaper

Komponentene brukt i forsøkene er produsert av Covestro og Jeanette Sund, leder for forskningsavdelingen i Danmark deltok den første av de tre dagene det ble blandet skum i laboratoriet. De materialprøvene som er testet for trykk og strekk er fra materialer Jeanette produserte den dagen hun deltok. Hun anbefalte 24 timers herdetid for utvikling av full styrke.

PU-skummet består av mange små gassfylte porer og har anisotrope egenskapet på strekk og trykk om testen utføres parallelt med heveretning eller vinkelrett på heveretning. Størst styrke har skummet parallelt med heveretning. Førsteamanuensis Arne Aalberg forklarte at dette skyldes at det er lettere å knuse en pore med trykk for da er det celleveggen som går til brudd pga trykk og påfølgende knekking. Ved et strekkbrudd er det celleveggen som må strekkes og da er det selve materialet som går til brudd. Dette forklarer større strekkstyrke enn trykkstyrke. Formen på cellene kan forklare ulik styrke parallelt og vinkelrett på heveretningen.

Materialtest utført av Covestro

I forbindelse med forsøk i Covestro's laboratorium i Randes i Danmark og i Mjøndalen i Norge med omfylling av rør med PU-skum, er det gjort to materialtester av Bayer Material Science (vedlegg 3). Testene er gjort ihht europeiske normer for prøving av PU-skum som EN 1602 (core density), EN 826 (compressive strength og E-modul) og EN 1607 (tensile trength og E-modul). Hovedresultatene er gjengitt her med et standardavvik (SA). Rapportene fra testene er vedlagt som vedlegg 5.

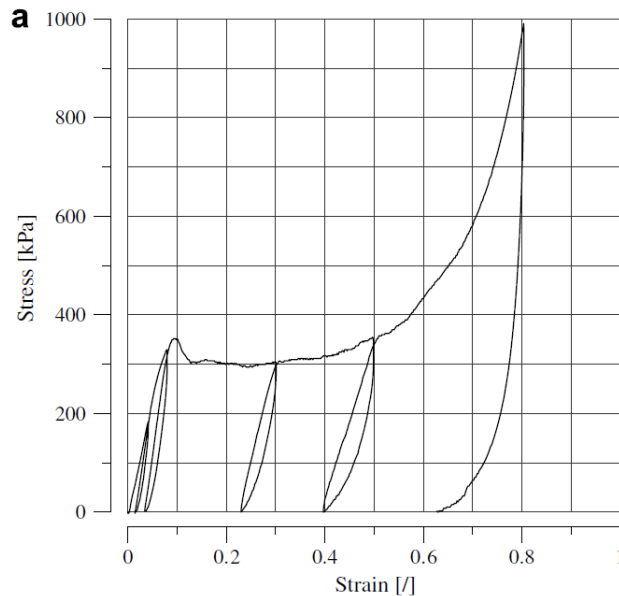
Tabell 14: Materialeegenskaper PU målt i tidligere arbeid

Nr	Beskrivelse	Blande- forhold ISO/POL [L/L]	Tetthet [g/l]	Trykk- styrke [kPa]	E-modul trykk [MPa]	Strekk- styrke [kPa]	E- modul strekk [MPa]
1	Mjøndalen, spray, prøveproduksjon, 20-30 mm lag i pappboks	100/100	52,4 SA:3,5	200 SA: 31,9	6,2 SA: 1,5	318 SA:39,1	10,6 SA: 2,1
2	Mjøndalen, spray, 10 mm lagtykkelse, fra pute rør ble lagt på	100/100	67,2 SA: 7	374 SA: 80,2	11,7 SA: 3,8	-	-
3	Laboratoriet i Randers (DK),	125/100	48,2 SA:0,5	269 SA: 81,5	7,2 SA:2,8	353 SA:32	10,1 SA:2,7

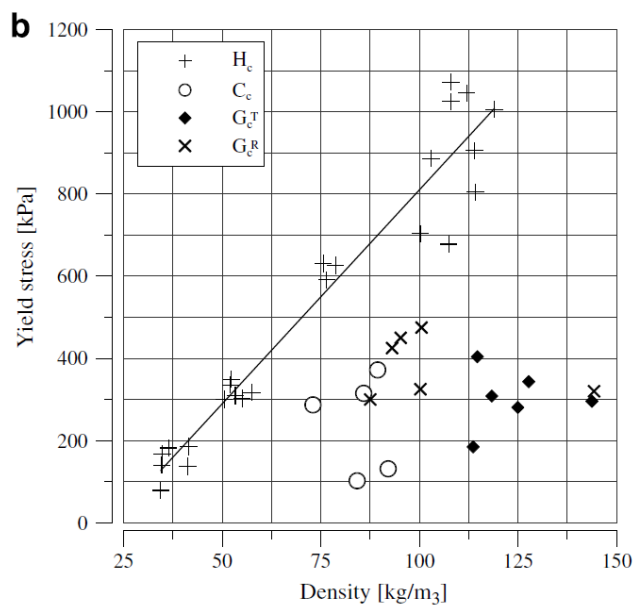
SA = Standardavvik

Materialtester utført av O. Buzzi et al (2009)

O. Buzzi et al (2009) har kjørt enaksiale trykktester på terninger av PU-skum. Materialet er homogent PU-skum med tetthet 52kg/m^2 . Kraftretningen er parallelt med skummets «rising direction». Resultatene er vist i figur 62 og 62. Legg merke til at materialet fastner betraktelig når tøyningen øker fra 60% og oppover.



Figur 61: Målt stress-strain på homogent PU med tetthet 52 kg/m^3 (O.Buzzi et al. 2009)



Figur 62: Flytespenning for PU i forhold til densitet. H_c er homogent PU-skum. (O Buzzi et al. 2009)

Figur 63 viser et plott med alle resultatene fra kompresjonstester gjort av Buzzi et al. Testene merket H_c er relevante i denne sammenheng. Disse viser flytespenningen for PU-skum med forskjellig densitet. H_c betyr homogent PU-skum produsert i laboratorium. De andre punktene er PU-materiale produsert i laboriet i lukkede tuber (C_c) og materiale sprøytet inn situ i grunnen med hensikt å korrigere setninger (G_c). G-prøvene er testet både parallelt og normalt på «rise direction».

5.4.2 Omfyllingsmasser

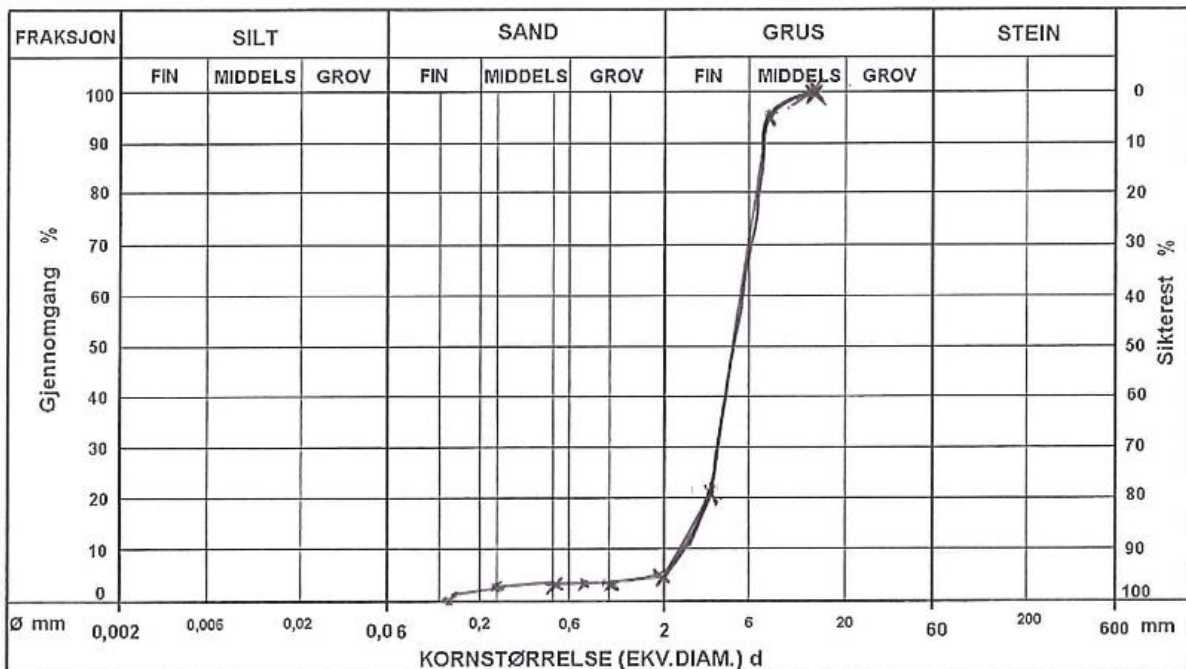
Tanken var opprinnelig å mikse ulike fraksjoner med sorterte naturmasser til noe som skulle ligne morenemasse og at andel grove korn skulle økes etter hvert for å se betydningen av grøvre korn (opp til 55 mm diameter). Underveis ble det beslutta å heller bruke 4-8 mm knust pukkk fordi dette er det samme materialet Bossel og Haugen (2013) brukte i sine laboratorieforsøk. Dermed vil det være lettere å sammenligne resultatene i denne rapporten med resultatene i deres rapporter. Derfor er 4-8 mm knust pukkk mer nøye beskrevet enn de andre omfyllingsmassene.

Det er brukt fire forskjellige omfyllingsmasser i torsjonsforsøkene:

- 0-8 mm vaska natursand fra Forset Grus AS (forsøk nr 1)
- 8-16 mm vaska naturpukkk fra Forseth Grus AS (forsøk nr 2)
- 8-16 mm vaska naturpukkk med kubisk form fra Årdal (forsøk nr 3)
- 4-8 mm knust pukkk fra Franzefoss pukkk AS avd Vassfjellet (forsøk nr 4-7)

4-8 mm knust pukkk fra Franzefoss pukkk AS

Materialet ble hentet samme dag som forsøk 4 ble gjennomført og materialet hadde da ligget ute og det hadde regnet natta før. Det ble ikke gjort måling av fuktigheten i materialet, men det støvet ikke under håndtering av materialene inn og ut av forsøksriggen. Kornfordelingskurva (fig 64) viser at 78% av kornene er mellom 4 og 8 mm og figur 65 viser formen på kornene.



Figur 63: Kornfordelingskurve 4-8 mm knust pukkk brukt i forsøk 4-7



Figur 64:4-8 mm knust pukk brukt i forsøk 4-7, kornform

Rørmaterialer

GRP- og duktile støpejernsrør er de to mest aktuelle rørtypene å bruke sammen med PU-skum. Dette fordi heftegenskapene for PU-skum er best på disse to materialene. PE-rør kan også være aktuelt å bruke, men disse må behandles utvendig for at PU-materialet skal hefte seg fast.

Måling av heft mot GRP og ulike typer ytterkappe p duktile støpejernsrør har ikke vært en del av dette arbeidet. Det er antatt en heftestyre på 170 kPa mot GRP og minst 200 kPa mot duktile støpejernsrør med sink/epoxy og sink/bitumen overflate. Dette er ikke verifiserte/bekreftede tall.

Derfor skal Covestro gjennomføre laboratorieforsøk for måling av heft-egenskapene for PU-skum mot røroverflater i uke 47/48 2015.

5.5 Måling av trykkfasthet og strekkfasthet i PU-materialet

5.5.1 Metode for måling av trykkfasthet og strekkfasthet

De tidligere refererte materialtestene Covestro har gjort på PU-materialet, følger EN 1602, EN 826 og EN 1607. På grunn av tiden til disposisjon og at det er vanlig i normene å oppgi trykkstyrke etter 10 % deformasjon, ble det valgt å ikke følge disse standardene. Vårt mål med testene var å gjøre enkle verifikasjonstester for å se om våre målinger stemte overens med det som var oppgitt av Covestro og å etablere spennings-tøynings diagram som viser materialets oppførsel ved påføring av strekk og trykk. Det ble derfor valgt å teste trykk ved å deformere kubiske terninger og å teste strekk ved å strekke formskjærte (?) materialprøver.

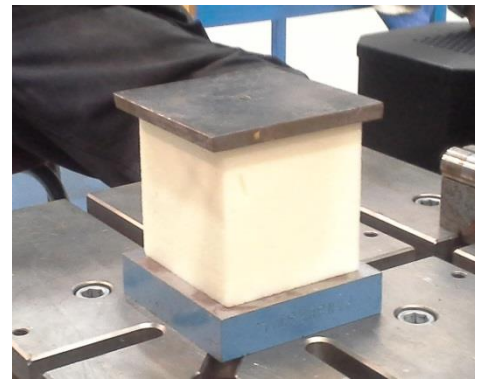
Sammenhengen mellom spenning σ [N/mm²], tøyning ε [dimensjonsløs] og E-modul E [N/mm²] er gitt ved:

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

Covestro oppgir materialparamtere både i kPa [kN/m²] og MPa [N/mm²]

Prøvematerialet

Prøvematerialet til de to terningene til trykkforsøkene og materialprøvene til strekkforsøkene, er skåret ut av PU-skum som ble produsert første dag det ble støpt sylindere til torsjonsforsøkene. Jeanette Sund fra Covestro utførte produksjonen av materialet som ble prøvet, men visste ikke om at det skulle gjøres materialprøver på disse. Prøvene kan derfor anses som tilfeldig utvalgt blant det skummet som ble produsert i forsøksperioden.



Figur 65: Terning 100 x 100 mm

Terningene til trykkforsøkene har følgende egenskaper:

Nr (merket)	Produksjon	Blandeforhold polyol/isocyanat	Retning på last	Yttermål	Vekt	Herdetid	Hastighet sammenpressing
1 (S)	Prøveblanding utstøpt i pappeske	100 g polyol 144 g isocyanat	Parallelt med heveretning	100 x 100 mm	45 g	6 dager	5 mm/min
2 (B)	Gjenværende skum i bønnebrukt til å blande skum til sylindere	100 g polyol 144 g isocyanat	Parallelt med heveretning	100 x 100 mm	46 g	6 dager	5 mm/min

Tabell 15: Data på prøvestykker brukt i strekk- og trykkforsøk

Materialet til strekkforsøkene er skåret ut fra samme sted og av samme blokk med PU-skum som terning nr 1. Det vil si at det er tatt ut én materialprøve i tillegg til terningen. Denne er skåret opp i fem ca 10 mm tykke prøvestykker. Formen på prøvene er vist i figur 67. Lengden av det innsnevrede området av prøven er 7,5 cm, men formen på overgangen mellom smalt og bredt parti gjør at denne lengden ikke kan leses helt eksakt.



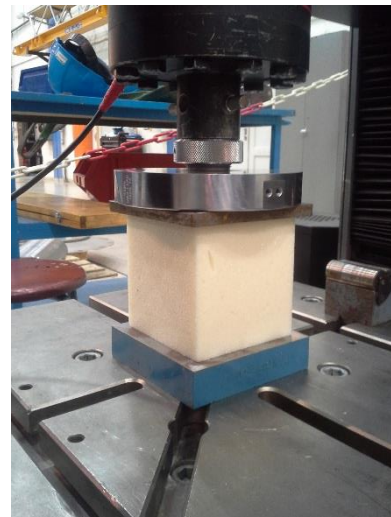
Figur 66: Prøvestykker til strekkforsøk

Prøvestykkene har følgende data:

Prøve nr	Areal (b x t) [mm ²]
1	14,17 x 9,99 = 141,6
2	13,89 x 9,99 = 138,8
3	14,02 x 9,72 = 136,3
4	14,05 x 9,79 = 137,5
5	13,70 x 9,87 = 135,2

Metode for måling av trykkfasthet

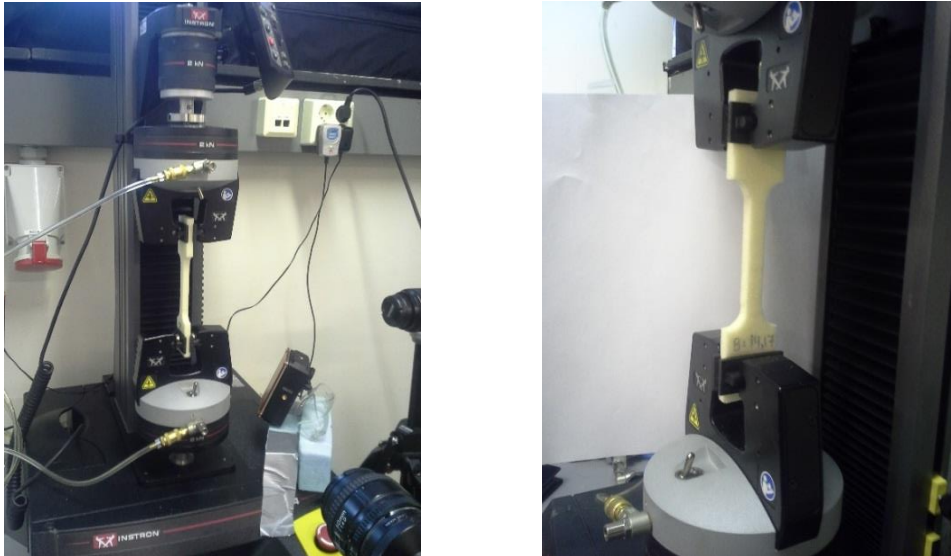
To terninger på 100 x 100 mm ble presset sammen til 90 % deformasjon i en Instron materialprøvemaskin på materialteknisk laboratorium. Oppsettet var som vist i figur 68 og 69. Dataprogrammet ble programmert til å starte forsøket når maskinen nådde en last på 50 N. Sammenpressinga skjedde med en hastighet på 5 mm/minutt. Dataprogrammet loggførte global forflytning av bjelken over prøva, tid og påført last.



Figur 67:Kjøring av terning 100 x 100 mm i prøvemaskin på materialteknisk laboratorium NTNU

Metode for måling av strekkfasthet

Materialets strekkfasthet måles av en Instron materialprøvemaskin som påfører prøvestykket strekkrefter med fast hastighet til det går til brudd. Maskinen er programmert til å sette opp en strekkraft på 2 N før den starter logging. Det er 15,0 cm lysåpning mellom gripehodene som holder prøven ved start. Det nedre gripehodet holdes i ro og det øvre gripehodet beveger seg med en hastighet på 2,1 mm/minutt. Maskinen måler global forflytning av det øvre gripehodet og logger tid, forflytning og kraft. Den samme testmetodikken brukes for å finne strekkegenskaper til stål, plast, treverk osv. Maskinen og oppsettet er vist i figur 69.



Figur 68: Kjøring av strekkprøve i prøvemaskin på materialteknik laboratorium NTNU

5.5.2 Resultat trykkfasthet

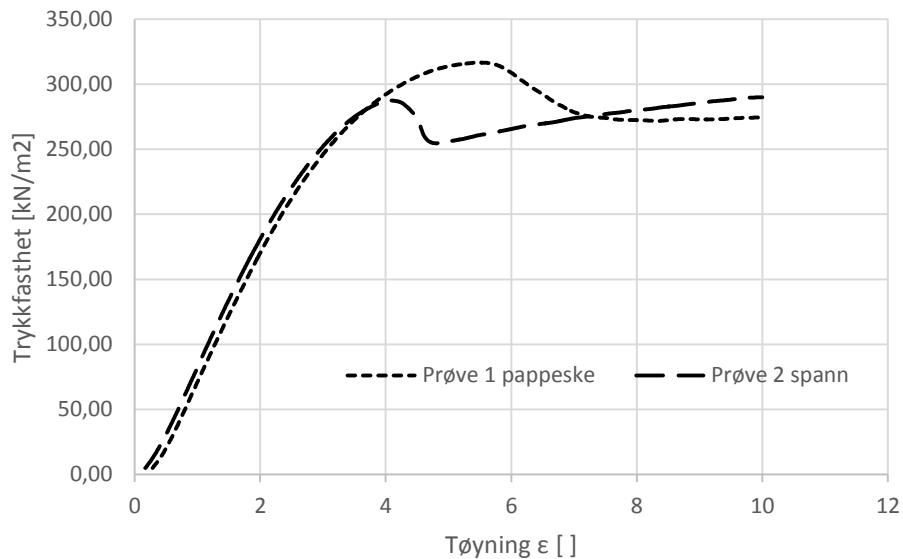
Prøvene har et lineært tøyingsforløp opp til ca 3% deformasjon, deretter flater kurvene mer ut og får en liten bruddknekk før de stiger svakt videre. Tabell 16 viser utregnet E-modul og trykkfasthet på terningene ved 1%, 2%, 4% og 10% deformasjon, samt trykkfastheten ved brudd.

Tabell 16: Resultater fra trykkforsøk

Nr.	E-modul ved 1% tøyning	Trykkfasthet ved 1% tøyning	E-modul ved 2% tøyning	Trykkfasthet ved 2% tøyning	E-modul ved 4% tøyning	Trykkfasthet ved 4% tøyning	Trykkfasthet ved brudd	Last ved 10% deformasjon
1	7,2 MPa	72 kN/m ² 72 kPa	8,6 MPa	171 kN/m ² 171 kPa	7,3 MPa	292 kN/m ² 292 kPa	317 kN/m ² (5,5% tøyning)	275 kN/m ²
2	8,3 MPa	83 kN/m ² 83 kPa	9,1 MPa	181 kN/m ² 181 kPa	7,2 MPa	287 kN/m ² 287 kPa	287 kN/m ² (3,9% tøyning)	290 kN/m ²

Trykkfasthet [kN/m² = kPa] = Last [kN] / areal av prøve [m²]

Figur 70 viser spennings-tøyningsdiagrammet for de to prøvene fra 0% til 10% tøying. Der er et tydelig fall i trykkfastheten ved 5,5% tøying for prøve 1 og 3,9% tøying for prøve 2. Dette punktet omtales i det videre som bruddpunkt.



Figur 69: Spennings-tøyningsdiagram for de to terningene

Figur 71 viser forløpet ved trykdeformasjonen.



Figur 70: Sammenpressing av terninger, form på materialet underveis

Målinger underveis mens terningen presses sammen indikerer ca. 5% tverrkontraksjon.

5.5.3 Resultat strekkfasthet

Tabell 17 viser maks påført strekk på prøvene ved brudd og utregning av strekkfasthet og tøyning. Beregning av tøyning baserer seg forenklet på at prøvestykkets tøyning fordels over det innsmalnede området som har en lengde på 75 mm. Figur 72 viser hvor prøvene fikk brudd. Figur 73 viser last – tøyningsforløpet.



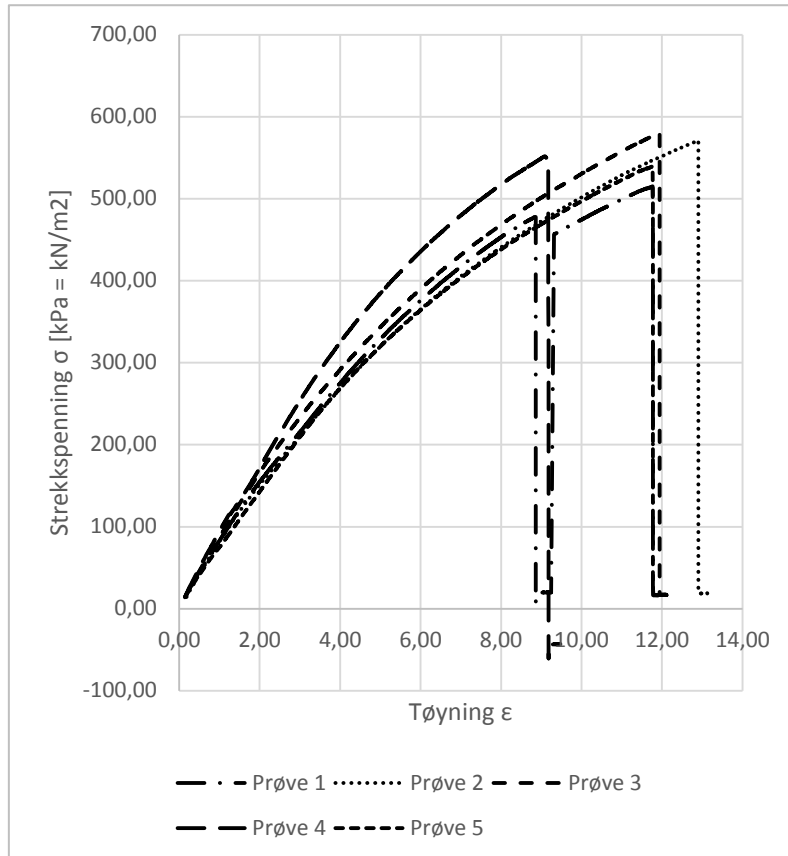
Figur 71: Bruddform på strekk-prøver

Prøve nr	Trøyning ved brudd [mm]	Strekkkraft ved brudd [N]	Strekkfasthet σ [kN/m ² = kPa]	Relativ tøyning ϵ [%]	Brudd E-modul [MPa]	$\epsilon = 2\%$ E-modul [MPa]
1	8,82	72,9	515	11,7	4,4	7,7
2	9,6	79,2	571	12,9	4,4	7,6
3	8,9	79,1	580	11,9	4,9	8,2
4	6,8	75,4	548	9,2	6,0	8,5
5	8,8	73,0	540	11,8	4,6	7,1

Tabell 17: Resultat måling av strekkfasthet

Tallene i tabellen gir en laveste strekkfasthet på 515 kPa og gjennomsnittlig strekkfasthet på 551 kPa med standardavvik på 23 kPa. E-modul er beregnet ved brudd og basert på en usikker verdi på tøyning. I beregningene er det tatt utgangspunkt i at tøyningen bare skjer i det innsnevra feltet som er 75 mm langt, men det vil skje noe tøyning i overgangen mot det brede feltet også. Derfor er ikke E-modulen å regne som en eksakt verdi. E-modul ved 2% tøyning er også beregnet og viser at materialet har en stivere oppførsel i starten, men beregningene inneholder samme usikkerhet rundt tøyning som E-modul ved brudd.

Kontrollmåling av prøvestykkene etter brudd, når maskinen går tilbake til utgangsposisjonen, viser at prøvestykkene påføres en varig deformasjon etter tøyning til brudd i str. orden 1-2 mm. Dvs at av en samla tøyning på 9 mm er ca 2 mm varig deformasjon og 7 mm elastisk.



Figur 72: Spenning-tøyingsdiagram for måling av strekkfasthet PU-skum

5.6 Diskusjon av materialparametre

5.6.1 Kapasitet til å tåle trykk

Oppsummert viser resultatene trykkstyrke i området mellom 275-290 kPa og E-modul i området 7-8 MPa for terninger med densitet på ca 45 kg/m³. Bayer har målt trykkstyrke på 269 kPa og E-modul 7,2 MPa for skum med romvekt 48 kg/m³. Det viser at skummet som er brukt i testene holder samme kvalitet som det som i tidligere forsøk.

Kurvene viser to viktige funn: at materialet deformeres lineært fram til ca 3% tøyning og at trykkfastheten når toppen ved ca 4% tøyning. Dette viktig kunnskap for å beregne deformasjonene i PU-materialet når vanntrykket og vekten av vannet kommer på.

Testprosedyren er automatisert og gir ut data med en oppløsning på 0,2 sekunder. Datafilen inneholder data om tid [s], tøyning [mm] og last [N]. Lasta regnes om til last pr areal, så det skal være lite rom for feil eller feiltolking av resultatene.

For å gi et bilde på styrken av skummet kan det kort nevnes at bæreevne ved 2% deformasjon i skummet og snitt trykkstyrke 170 kPa for et projisert areal av et 6 meter langt Ø 600 mm rør, er i området $6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} \times 170 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 612 \text{ kN}$, som vil si ca 62 000 kg.

1% deformasjon og trykkstyrke på 70 kPa gir en bæreevne på 252 kN som vil si ca 25 700 kg. Vannmengden i et 6 meter langt Ø600 mm rør er ca 1,7 m³ som tilsvarer 1 700 kg + rørvækt ca 300 kg (GRP). Ved 1,0 meter overdekning og tyngdettetthet på 20kN/m³ (grus) blir

overdekningens vekt på det samme arealet 72 kN som tilsvarer ca 7 300 kg. Summen av vann, rør og overdekning blir i str. orden 9 300 kg eller ca 26 kN/m². Det tilsier rundt 0,5 % tøyning av PU-materialet med de opptredende krefter.

5.6.2 Kapasitet til å tåle strekk

Alle de fem prøvene som inngikk i testserien av strekkstyrke viser noenlunde samme resultat på 500-550 kPa. Det er ca 1,8 ganger trykkstyrken og er betydelig høyere enn det Covestro har målt, som er i snitt 318-353 kPa. E-modul beregnet her er ca halvparten av E-modulen målt av Bayer Material Science og skyldes forskjell i standard å måle etter.

Den store forskjellen i PU-materialets trykk- og strekkstyrke skyldes som tidligere nevnt celleveggene må strekkes til brudd, mens de i et trykkforsøk kollapser på grunn av knekking. Strekkstyrken er spesielt interessant for å regne på kraftopptak ved vertikal og horisontal avvinkling og PU-skummets evne til å «lime» sammen rørene til en streng med strekkfaste egenskaper.

Som et eksempel kan vi se på et Ø 500 mm rør med kvadratisk form på skummet rundt røret og en minste tykkelse på 200 mm på skummet mot røret. Da får vi et kvadrat med sidekanter på 0,9 m. I beregningene brukes Bayer sine tall på 320 kPa strekkstyrke og E-modul på 10,0 MPa til å se forenklet på de to tilfellene

1. Tverrsnittets kapasitet til å tåle rent strekk
2. Tverrsnittets momentkapasitet til å tåle avvinkling

Tverrsnittets strekkkapasitet

Forutsetningen for regnestykket er at det ikke er avvinkling mellom rørene som gir momentkrefter i bend og det dermed oppnås en jevn fordeling av strekkraftene over tverrsnittet.

Tverrsnittet har et skumareal A_s på

$$A_s = 0,9 \text{ m} \times 0,9 \text{ m} - \pi \times (0,25 \text{ m})^2 = 0,614 \text{ m}^2$$

Det gir en kapasitet til å overføre strekkstyrke på

$$S = 0,614 \text{ m}^2 \times 320 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 196 \text{ kN}$$

Som tilsvarer ca 20 000 kg ved brudd. Det hører med at det må legges inn en materialfaktor/sikkerhetsfaktor i regnestykket og at ved brudd er deformasjonene i str. orden 10-12% og slik sett uakseptable.

Det er usikkerhet rundt hvor stor lengde i aksiell retning spenningene vil fordele seg over, dvs lengde fra 0-punktet til det mest belastede punktet i tverrsnittet. Dersom de fordeles seg over 1,0 meter til hver side av skjøten og tas opp av heft mot røret og heft mot grøfteveggene, blir ikke deformasjonene så store som det først kan virke som. Dersom det settes en grense på maks 2% deformasjon viser resultatene fra forsøkene strekkkapasitet på ca 145 kN/m². Det gir

tverrsnittet en strekkstyrke på 89 kN eller 9075 kg. Med lineært avtagende spenninger gir det en snittdeformasjon på 1 % over 2 meters lengde som gir deformasjoner på 2,0 cm.

Tverrsnittets momentkapasitet

Ved å bruke bjelketeori og formelen for bøyepenninger over bjelketverrsnitt (Irgens 2008)

$$\sigma_b = \frac{M}{I}y$$

kan momentkapasiteten M beregnes når bøyepenningen σ_b som opptrer i ytterste fiber settes lik strekkfastheten. Tverrsnittet har et andre arealmoment I og y er avstanden fra arealsenteret og ut til punktet der spenningen beregnes.

Annet arealmoment for kvadratet av PU-skum minus rør er:

$$I = \frac{bh^3}{12} - \frac{\pi D^4}{64} = \frac{0,9 \times 0,9^3}{12} - \frac{\pi \times 0,5^4}{64} = 0,0516070384 \text{ m}^4$$

Det største momentet som kan påføres «bjelken» er i str orden

$$M = \frac{\sigma_b I}{y} = \frac{320 \text{ kN/m}^2 \times 0,0516070384 \text{ m}^4}{0,45 \text{ m}} = 36,7 \text{ kNm}$$

I regnestykket videre forutsettes det at to stk 6,0 meter lange rør som ligger i hverandre med en avvinkling på 2 grader som setter opp et moment over rørskjøten. Etter kravene i retningslinjene til NVE (NVE, 2011) kan det bare regnes med en stabiliserende effekt fra 1/3 av lengden på tilstøtende rør ved beregning av stabilitet for horisontal og vertikal avvinkling. Regnestykket baserer seg derfor på et forenklet oppsett der avvinklinga utover i bendet virker som en punktlast på en fritt opplagt bjelke med lengde 1/3 av lengden på de to tilstøtende røra. Irgens (2009) (tabell 5 nr 9) formel for moment M på en fritt opplagt bjelke med lengde L og en last F som angriper i en avstand a og b fra hver sin ende av bjelken gir kapasitet til å tåle

$$F = \frac{ML}{ab} = \frac{36,7 \text{ kNm} \times \left(\frac{6}{3} + \frac{6}{3}\right)m}{6/3m \times 6/3m} = 36,7 \text{ kN}$$

Med nedbøyning u_{\max} når F angriper midt på bjelken

$$u_{\max} = \frac{FL^3}{48EI} = \frac{36,7 \text{ kN} \times (4\text{m})^3}{48 \times 10000 \text{ kN/m}^2 \times 0,051607 \text{ m}^4} = 0,095 \text{ m}$$

Under forutsetning av at røret er stivt vil 0,095 m utbøyning av et 6,0 m langt rør tilsvare en økning i vinkel på 0,9 grader.

Ved 2,9 graders avvinkling og Ø500 mm rør tilsvarer 36,7 kN i utadretta kraft i et bend normalt på røraksen en vannsøyle på ca 800 m. Det er uten at jorden oppå brukes som stabiliserende kraft. Beregninga av utadretta kraft baserer seg på et regneark som ikke kan offentliggjøres i denne oppgaven. Derfor er ikke utregningene bak tallet vist her. Regnestykket baserer seg på at en gitt avvinkling og et gitt trykk gir en utadretta komponent i muffen.

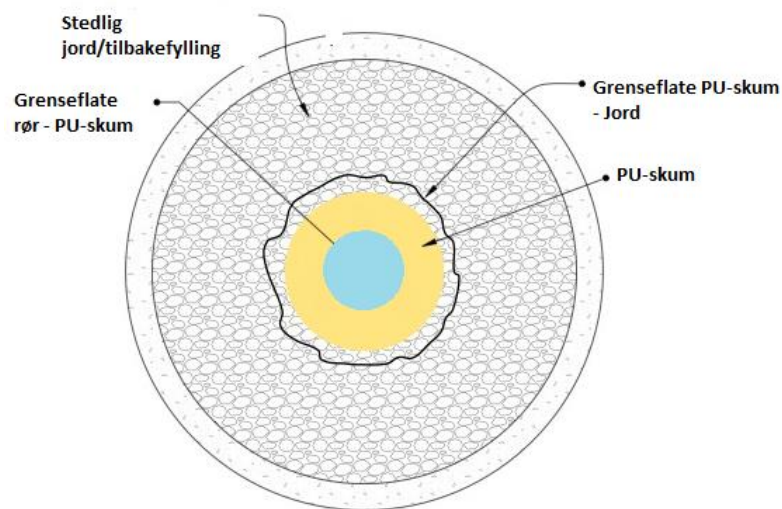
Det må understrekes at dette er grove regnestykker, men de viser kapasitet langt over vekten av et typisk PN10 SN 1000 Ø 500 mm GRP-rør på 35 kg/m, som skummet er ment å skulle stabilisere og holde i riktig posisjon.

Forløpet stress-strain for deformasjon fra 0-90 % i trykkforsøkene i laboratoriet har i hovedsak samme form som forsøket fra Buzzi et.al (2009) vist i figur 62. Materialet fastner betraktelig fra 60% sammentrykking og oppover. Det som er den største forskjellen er at i våre forsøk når materialet flyt ved 4-5% tøyning, mens figuren til Buzzi et al indikerer flyt først ved 10% deformasjon. Det interessante med forsøkene til Buzzi et al er at de har målt flytspenning på opp mot 1000 kPa for PU-skum med tetthet på 100-115 kg/m³.

5.7 Metode, oppsett, utstyr og fremgangsmåte for forsøk

5.7.1 Grov systemanalyse

Ved bygging av rørgater med PU-skum som omfylling er det tre hovedkomponenter som inngår; rør, PU-skum og de stedlige jordmassene. Det er to grenseflater som må overføre skjærkrefter fra det ene materialet til det andre: rør – PU-skum og PU-skum – jord. For å si noe om styrken til systemet er det disse grenseflatene og materialene som må studeres og sammenlignes med dagens metode.

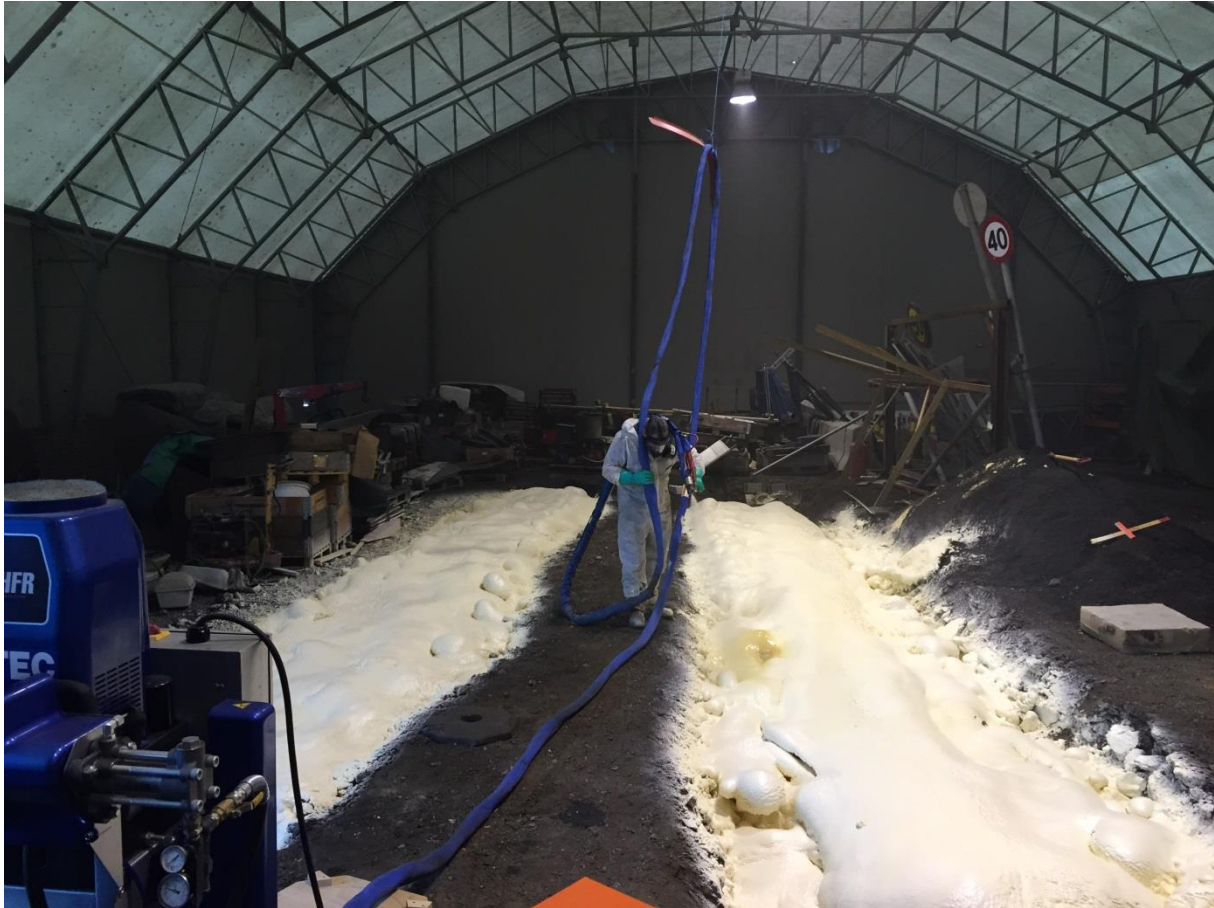


Figur 73: Grenseflater og materialer, prisnippeskisse for bruk av PU-skum rundt rør

Tidligere arbeid

I februar 2015 gjennomførte Odelskraft et feltforsøk i Mjøndalen i samarbeid med Isachsen Entreprenør AS og Covestro. NTNU var ikke involvert i denne testen og har kun fått referert observasjonene som bakgrunnsinformasjon for valg av testmetode i laboratoriet. Det ble gravd to parallelle grøfter og montert ett stk Ø 500 mm GRP rør med lengde 12 meter i hver grøft. Grøft nr 1 ble fylt med skum helt opp til jord-overflata og nr 2 fikk fylt tilbake ca 60 cm masser som overdekning over skumlaget. I begge tilfellene ble skummet sprøytet direkte mot «urørte» grøftevegger i bunn og side. Figur 75 viser et oversiktsbilde under installasjonen av rørene.

Vekten av skum og rør på grøft nr 1 var ca 1600 kg. Det ble montert en jekk med 30 tonns skyvekapasitet i den ene enden for å prøve å skyve rørgata ut av posisjon og framprovosere et brudd. Det klarte de ikke, men en stor stein (ca volum 1 m³) som var satt opp som mothold, ble i stedet presset inn i massene bak jekken.



Figur 74: Oversiktsbilde fra forsøk utført i Mjøndalen. På grøfta til venstre ble det ikke fylt over masser før påføring av trykk med jekk. På grøfta til venstre ble det lagt på ca 0,6 m overdekning. (Foto: Penstock BV)

Basert på tradisjonell dimensjonering med bruk av friksjonsfaktor for beregning av glidestabilitet på rørgater, skulle en egenvekt på 1800 kg og en friksjonsfaktor på 0,5 la seg bevege med en kraft i størrelsesorden 900-1100 kg. Altså langt lavere kraft enn 30 tonn. Det må derfor være andre krefter og mekanismer enn dagens modeller for glidestabilitet på rørgater tar hensyn til, som gjør seg gjeldende.

5.7.2 Grunnlag for valg av testoppsett

I prosessen med å velge en testmetode som kunne ta opp i seg disse antatte effektene, ble det fokusert på følgende:

- at skummet ekspanderer under herding og setter opp et radielt trykk ut mot grøfteveggen. Dette øker hovedspenningene i jorda og gir større skjærkapasitet i jordarten.
- at skummet limer seg til de ytterste kornene i jordmaterialet og dermed fastholder disse med en kraft like stor som skjærstyrken til skummet. Avhengig av kornstørrelse gir dette en fortanningseffekt der de limte korna vil låses mot de ulimte som må begynne å «hoppe over» hverandre for å flytte seg. Dette kornskjelettet er avhengig av forflytte seg radielt ut fra rørraksen for at skummet skal flytte seg. Dermed må det til et oppsett som kan bevare disse radielle spenningene som skapes når kornene holder på å gli over hverandre.

- at et laboratorieforsøk i liten skala ikke skal beheftes med for mye labeffekter pga lav høyde på overdekning. Det ble antatt at det tidligere forsøksoppsettet til Bossel/Breien og Bergsaker/Baargaard ville gi for liten fastholding i høyderetning til at fortanningseffektene ved fastlimte korn ville bli registrert i full størrelse. Rør/skum ville ha for stor mulighet til å gli etter ved å forflytte seg opp og gli over korna under i stedet for at korna satte opp interne spenninger.
- At formen på strengen av PU-skum som sprøytes mot en grøftevegg vil ha til dels store ujevnheter og lime fast alle korn som ligger ut mot overflaten. Det vil si alt fra små leirkorn til store steiner. Denne limeeffekten og den ujevne formen gjør at det er grensenettet skum-jord som er mest interessant å forske på.

Torsjonsmodell v.s uttrekksmodell

I et trekkeforsøk der et rør trekkes horisontalt ut av en omfyllingsmasse slik Bossel og Breien (200--) og Bergsaker og Baargaard gjorde, er det resultatene av spenningene som virker inn mot røroverflaten multiplisert med en friksjonsfaktor, som angir motstandskraften mot at røret kan trekkes ut i aksial retning. Det er en skjærspenning (τ) som skal overvinnnes for å sette røret i bevegelse. Størrelsen på skjærspenningen er avhengig av de radiale spenningene inn mot røret normalt på røraksen (σ) og friksjonsfaktoren (μ). Derfor skal det samme mengde kraft til for å trekke røret ut i aksial retning som å dreie røret rundt i tangensiell retning. Det er bare å skifte retningen på den påførte krafta.

Formlene dette bygger på er vist i kapittel 5.7.3, og viser skjærmotstanden mot bevegelse er den samme i begge tilfellene. Følgelig kan resultatene fra forsøk basert på torsjon omregnes til motstand mot uttrekk i aksial retning.

Basis for forsøksmodellen

Valgt forsøksmodell er inspirert av vingeboresprøver for måling av skjærstyrke i leire, der et vingebor presses ned i en uforstyrret del av leira. Det settes et moment på vingeboret og sammenhengende moment-rotasjon måles. Ved brudd vil vingeboret ha skåret ut et sylindrisk volum av jordarten og med det målte momentet kan de opptredende skjærspenningene som virket på utsiden av dette volumet ved brudd, beregnes. (Emdal 2009)

Rørmaterialet

Testing av selve rørmaterialet inngår ikke i dette arbeidet, da det forutsettes at rørmaterialet som brukes er godkjent for bruk i Norge og at materialparametrene er kjent. Kreftene som oppstår kommer fra røret i seg selv, vekten av vannet og bendkrefter pga avvinkling og det forutsettes at røret i seg selv er i stand til å overføre disse kreftene ut til rørperiferien.

Grensesjiktet rør-skum

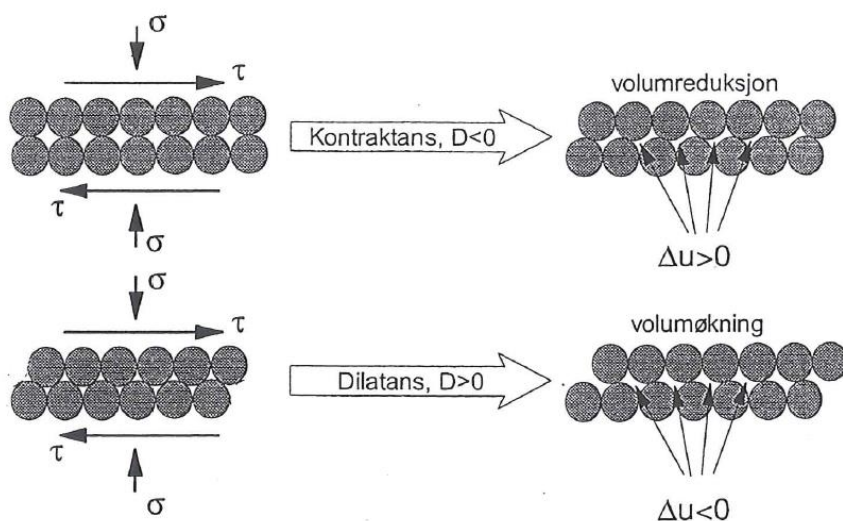
Covestro skal gjøre forsøk som dokumenterer heftegenskapene mellom GRP-rør og PU-skum. Foreløpig er det kalkulert med en vedheft på ca 170 kPa på GRP og 200 kPa mot duktilt støpejern. Det vises og til standarden for fjernvarmerør NS-EN 253:2009 der minste kravet til aksial skjærstyrke er på 120 kPa og tangensiell skjærstyrke er 200 kPa.

PU-skum

Dersom vi forutsetter at det er røret i seg selv som skal være drivende kraft, vil opp tredende skjær avta lineært utover fra overgangen rør-PU-skum. Jo lengre ut fra rørraksen man kommer jo mindre blir opp tredende skjærkraft fordi arealet kraften fordels over øker. PU-materialet vil påkjennes mest nærmest røroverflaten og dermed der dette området like under overflaten som går til brudd først dersom skjærkapasitetne i jorda er større enn opp tredende skjær overført gjennom PU-skummet.

Grenseflaten PU-skum jord/grøftekant

De jordkornene som kommer i kontakt med skummet mens det skummer opp før det herder og få en hinne utenpå, vil lime seg fast til skummet. Denne limeeffekten fører til at det blir et lag med fastlimte stein- og jord-korn langs overflaten på PU-skummet. Dette vil låse seg mot de løsere jordkornene som ligger lag med jordkorn lengre ut fra de fastlimte. For at det skal oppstå brudd i denne grenseflaten må kornene begynne å gli over hverandre eller det oppstår så store spenninger at kornene løsner fra PU-skummet. Som figur



Figur 75: Ved skjærbrudd må kornene gli over hverandre og påføre spenning er på nabokorn. Fra Emdal (2009)

Jord

Jordens skjærstyrke kan måles og er et rent geoteknisk problem. Dersom det antas at limfugen mellom jordkorn og PU-skum holder, vil overflaten på skummet fremstå som et svært grovt sandpapir og bruddet vil komme til å gå i selve jordmassen ved at kastlimte korn må skli mot løse korn i jordarten. De fastlimte kornene vil måtte flytte på de nærliggende kornene og slik sette opp passive jordtrykk foran de korene som dyttes på.

5.7.3 Teoretisk grunnlag for forsøket

Sammenhengen mellom dreiemoment (torsjon) og skjærspenninger

Kraften F [N] som jekken trekker med i en arm med avstand fra senter a [m] gir et dreiemoment M [Nm] etter (5.1)

$$F \times a = M \quad (5.1)$$

Dreiemomentet M [Nm] kan regnes om til en tangensiell resultantkraft T [N] for alle radiuser r [m] etter (5.2).

$$T = \frac{M}{r} \quad (5.2)$$

Opptredende skjærspenning τ [N/m²] på en sirkulærsylindrisk overflate med areal $A_{\text{overflate}}$ [m²] gitt av radius r [m] og høyde h [m] kan regnes etter (5.3):

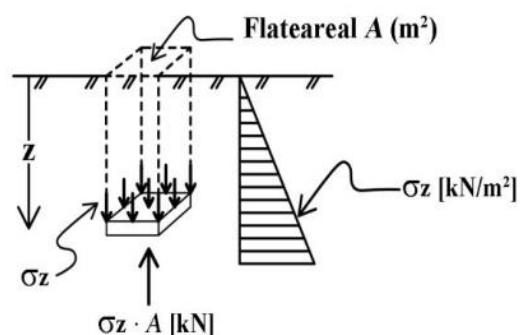
$$\tau = \frac{T}{A_{\text{overflate}}} = \frac{T}{2 \times \pi \times r \times h} \quad (5.3)$$

Som en forenkling for oppsettet antas det her at den tangentielle resultantkraften som påføres prøvestykket i ett konsentrert punkt, fordeler seg likt ut over hele prøvestykket.

Sammenhengen mellom jordtrykk og skjærspenninger

Vertikale spenninger

Vertikale spenninger kan som regel fastlegges ved beregning av overlagingstrykket. En installasjon på en gitt dybde z i jorden påvirkes altså av spenninger satt opp av tyngden av jorden og installasjonene over og på siden. Dersom jordmaterialet er homogent og uten ekstra vektbelastninger fra nyttelast q vil vertikalspenningen σ_z være lik tyngden av overliggende jord pr flateareal A .



Figur 76: Beregning av vertikale spenninger i jordmaterialer (Bergsaker og Bårgaard, 2012)

Det skilles mellom totalspenning σ_z som inkluderer poretrykk u , og effektivspenning σ'_z der poretrykket u er trukket fra etter følgende sammenheng:

$$\sigma_z = \sigma'_z + u \quad (5.4)$$

Forsøkene er gjort med drenerte masser og det regnes derfor videre med effektivspenninger som basis. Da regnes opptredende vertikal normalspenning σ'_z [kN/m²] i en gitt dybde z [m] i et jordmateriale med tyngdetetthet γ_j [kN/m³] etter:

$$\sigma'_z = \gamma_j \times z - u \quad \text{der } u = 0 \quad (5.5)$$

Horisontale spenninger

Horisontalspenninger er noe vanskeligere å bestemme og er oftest gitt som en andel av vertikalspenningen (Emdal 2009). Dette forholdet kalles hviletrykkskoeffisienten K_o og er angitt som

$$K_o = 1 - \sin\varphi$$

Der φ [°] er friksjonsvinkelen til jordmassen. Det gir følgende sammenheng mellom vertikalt og horisontalt jordtrykk:

$$\sigma'_h = \sigma'_v \times K_o$$

I forsøkene brukes en stående sylinder som det fylles et homogent jordmateriale rundt. Vertikalspenningen σ'_v er lineært økende med dybden og figur XXX viser at det dannes en trekant når spenning plottes mot dybde. Den gjennomsnittlige horisontale spenningen $\bar{\sigma}'_h$ som virker inn mot sylindringen, angriper i trekantens tyngdepunkt $2/3 \times z$ regnet fra toppen.

$$\bar{\sigma}'_h = K_o \times \gamma_j \times z \times 2/3$$

Når gjennomsnittlig opptredende horisontal spenning $\bar{\sigma}'_h$ [kN/m²] er fastsatt ganges denne med overflatearealet av prøven $A_{\text{overflate}}$ [m²] og vi får kritisk tangensiell resultant T_{kritisk} [kN] som er prøvens kapasitet til å motstå bevegelse.

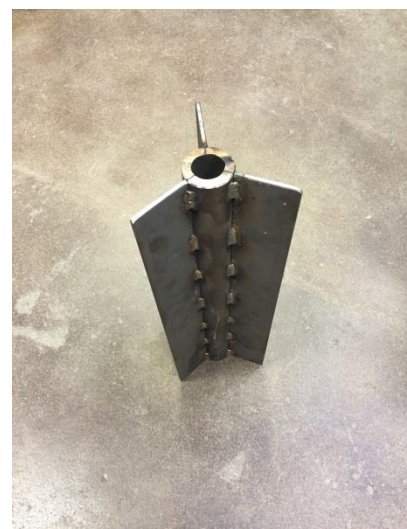
$$\sigma'_{h,resultant} \times A_{\text{overflate}} = K_o \times \gamma_j \times z \times 2/3 \times 2 \times \pi \times r \times z = T_{\text{kritisk}}$$

Det er T_{kritisk} vi måler når prøvestykket begynner å rotere og vi kan dermed bestemme opptredende kritisk skjærspenning i den radius som er ønskelig.

5.7.4 Metode

Valg av form på prøvestykket og modell

Målet med modellen er å kunne beregne opptredende skjærkrefter i sjiktet PU-skum-jord. Det er tidligere gjort forsøk og testing av både rørmaterialet og heft mellom GRP/duktilt støpejern og PU-skum. Derfor inngår ikke dette i forsøkene gjort her. Styrken i PU-skum er også godt dokumentert i andre sammenhenger og det finnes egne standarder for f. eks PU-skum brukt i fjernvarmerør (NS-EN 253:2009). Det som gjenstår er studering av skjærkapasitet i grensesjiktet mellom PU-skum og jord. Testoppsettet baserer seg derfor på å påføre et moment på en sirkulær sylinder av PU-skum som roteres mot et lag med omfyllingsmasser som hviler mot en betong ytter-ring.



Figur 77: Stålrør med vinger som støpes inn i PU

Beregninger gjort før forsøkene starta, viste at grensesjiktet rør- PU-skum trolig ikke ville være sterkt nok til å overføre nok skjærkraft til PU-laget, slik at det ble bevegelse mot jord. Bruddet ville trolig komme i mellom PU-skum og rør før det ble bevegelse mot jorda. Derfor ble det valgt å ikke bruke et rør i senter av testoppsettet. I stedet ble det valgt å bruke en stålsylinder som fikk påsveisa tre vinger for å sikre god nok overføring av momentkraft til hele periferien av PU-sylinderen.

Sylinderens ytterflate vil ha en varierende og uregelmessig form med «utvekster» og «innsynkninger». Når «utvekstene» beveges mot jordmaterialet vil det oppstå lokale soner med passivt jordtrykk foran «utvekstene». «utvekstene» kan betraktes som ett stort korn som er limt fast i ytterkanten på skummet. For at dette kornet skal bevege seg må det skyve bort alle de mindre kornene som ligger foran.

På de mer plane delene av sylinderoverflaten vil de ytterste kornene være limt fast til PU-materialet. Det samme vil skje der. Når de fastlimte kornene prøver å flytte på seg vil det bygge seg opp spenninger (passivt jordtrykk) helt til de løse nabokornea gir etter.

Når sylinderen roteres vil disse kreftene få en horisontal og tangtiell retning ut i jordmassene. Størrelsen på spenningene avhenger av jordtrykket, pakningsgrad, kornstørrelse og dermed muligheten kornene har til å gli oppå hverandre.

Den ytre betongringen skal etterligne spenningsforholdene i jorden slik at de spenningene som bygger seg opp mellom jordkornene når rotasjonen starter før kornene begynner å hoppe over hverandre, skal bevares og gi utslag i økt motstand mot å dreie prøven. Med en sylindrisk modell blir det like forhold nedover i dybden under hele forsøket og det er en lett definerbar geometri å regne på.

To teknikker var mulig for å lage en sylinder av PU-skum. I utgangspunktet er den mest riktige å bruke netting eller frysing av omfyllingsmassene slik at de er stive nok til å stå oppreist og til å danne en åpen sylinder ned i jordmaterialet som PU-materialet kan helles oppi. Dette medfører spørsmål om nettingens påvirkning på resultatet og mulige problemer med at steinmaterialet ville absorbere for mye varme til at vi fikk full limeeffekt av korn til PU-materialet.

Den andre muligheten, den som ble valgt, gikk ut på at bruke en Ø 250 mm sylinder av PE-materiale som form og støpe ferdige sylindre av PU-materiale som så kunne monteres i testriggen og fylles rundt med jordmasser. Stålsylinderen med vingene ble plassert i senter av PE-sylinderen og PU-materialet tømmt oppi. Metoden fører til at skummet kan ekspandere fritt og den overskytende mengden kan renne ut på toppen av sylinderen. Når sylinderen har stivnet tas den ut av forma. Før montering i testriggen blir sylinderen rulla rundt i ureagert PU-materiale som hefter seg på overflaten. Så monteres den i riggen og valgt jordmasse fylles rundt. Dette må skje hurtig for at ikke skummet skal herde og danne en hard overflate før det kommer i kontakt med kornene. Massene tømmes i betongringen med 10-liters bøtter . Disse må tømmes i slik at massene ikke tømmes mot sylinderen. Det vil føre til at massene drar av det ureagerte PU-materialet på sylinderens og det blir en mindre heft og utvikling av ujevnheter enn planlagt. Prinsippet er vist i figur 78 der også det ureagerte PU-materialet som sylinderen er rulla i vises.



Figur 78: Montering av PU-sylinder og omfylling med masser. Ureagert PU synes som gult flytende materiale på kjernen.

For å påføre momentet på PU-sylinderen brukes en arm som festes i senter av prøven og griper tak i en av vingene som støpt inn i PU-skummet. I forsøk nr 2 ble denne vingen bøyd uten at prøva bevega seg. I de senere forsøkene ble det sveiset på armeringsjern mellom vingene som skulle fordele krafta videre fra den vingen som armen griper tak i de to andre vingene.



Trekkraften settes opp med en håndjekk, måles av lastcelle og logges av dataprogram. Figur 79 viser innfestinga i stålplata der lastsella er forankra og håndjekken som ble brukt. Innfestinga er sveisa fast i samme stålplate som betongringen er sveisa fast til.

Figur 80 viser oppsettet før ifylling av skum og omfyllingsmateriale. Armen som påfører momentet på GRP-røret er opplagra i senter av modellen og roterer prøvestykket rundt.

Figur 79: innfesting av lastcelle og manuell jekk i samme plate som betongringen er sveiset fast til



Figur 80: Oversikt over forsøksoppsett. Jekken festes i øyebolten på armen som påfører moment på vingene på sylindere nede i betongringen. Når armen beveges vil prøvestykket rotere. Fastsveising av betongringen synes nede til høyre.

Alt utstyr som brukes er montert på en 40 mm stålplate. En Ø650 mm betongring som er 500 mm høy er sveisa fast i stålplata slik at den ikke skal bevege seg når momentet påføres. PU-sylinderens kjerne av stålrør tres ned på en fastsveisa aksling i senter av betongringen. Mellom stålplata i bunnen og PE-sylindere legges det en tynn metallskive og to lag med 0,2 mm byggplast for å hindre at PU-skummet hefter i stålplata når det herder og at det skal bli friksjon mot stålplata. En låsering som settes på på toppen av betongringen, holder PU-sylindere i riktig posisjon når trekket i armen starter. I enden av stålplata er det sveisa fast et stålrør som håndjekk og lastcelle monteres i.

Påvisning av bruddforløp i jord-massene

På alle prøvene ble det malt på radielle striper ut fra PU-sylindere for å studere hvor langt ut fra grenseflaten jord- PU-skum bruddet i jordmassene kommer. Hensikten er å kunne dokumentere om bruddet går som et rør-jord-friksjonsbrudd, altså et brudd der massen sklir mot f. eks en røroverflate, eller om det er et friksjonsbrudd i selve jordmaterialet.

5.7.5 Data om forsøkene

Totalt ble det gjennomført sju forsøk i torsjonsrigger. Under følger en oversikt over disse

Nr	Beskrivelse prøvestykke	Omfillingsmasse	Høyde omfylling	Merknad
1	PU-skum sylinter støpt i Ø 250 mm PE ytterkappe, fikk herde ca 1 time. Ble først rulla rundt i ureagert PU-skum, så rulla rundt i sand før innfesting i rigg. Herdetid i rigg ca 2 timer.	0-8 mm vaska sand fra Forset grus, manuelt stampa med 50 x 50 mm planke. Jordfuktig.	500 mm	Lav hastighet på drill under blanding (< 1000 rpm) Ca 30 graders vinkel på arm i forhold til trekkretning, armlengde ca 0,82 m
2	Sylinder støpt i 250 mm PE-ytterkappe, herdet ca 3 timer før den ble montert i riggen. Det ble skåret hull i en bøtte som ble tredd utenpå sylindren. Det var 1-3 mm klaring mellom bøttekant og sylinder. Det ble fylt pukk rundt bøtta i en høyde på ca 25 cm. Det ble tømt ureagert PU-skum blanding oppi bøtta som så ble heist opp. Dette ble gjort to ganger for å fylle helt opp. Herdetid i rigg ca 2 timer.	8-16 mm vaska naturpukk fra Forset Grus AS. Manuelt lett stampa med 50 x 50 mm planke	500 mm	Skum-materialet trengte langt innover i pukklaget. Betydelig mer skum tilført ved montasje av dette forsøket enn de andre. Pukk ble pressa opp i toppen pga trykk. Armlengde 0,67 m
3	Sylinder støpt i 250 mm PE-ytterkappe. Herdetid ca 15 timer. Først forsøkt å rulle rundt i ureagert PU og så rulla rundt i pukk, men pukken hefta seg ikke fast. Derfor avbrutt og PU-materialet som hadde hefta seg på ble skåret av igjen. Nytt forsøk der sylindren ble rulla rundt i ureagert PU og montert i riggen. Pukk ble så tømt i ringen så fort det lot seg gjøre. Herdetid 1 time og 20 minutt i rigg.	8-16 mm Årdal naturpukk med kubiske korn. Tørr. Ikke komprimert.	350 mm	Pga feil vinkel på vingene for innfestingsanordningene på armen det skulle trekkes, ble forankringspunktet for jekken flytta til et annet mothold. Armlengde 1,0 m
4	Sylinder støpt i 250 mm ytterkappe, herdetid ca 18 timer. Rullet rundt i ureagert PU-masse før montering i forsøksrigg. Omfillingsmasse tømt mot betongringen for å hindre meddriving av skum fra prøvestykket. Herdetid i rigg 2 timer	4-8 mm knust pukk fra Franzefoss pukkverk, Jord-fuktig, støver ikke. Fottråkket på toppen etter avretting 2 ganger	400 mm	Skummet som ble rulla på reagerte fort og det var dårlig limeeffekt på de øverste 10-15 cm av prøven. Armlengde 0,67 m
5	Sylindren fra forsøk nr 3 ble rensket for stein og skåret ned til om lag samme diameter som den ble støpt etter. Rullet rundt i ureagert PU-masse og montert i rigg. Omfillingsmasse tømt mot betongringen for å hindre meddriving av PU-materiale på sylindren. Herdetid i rigg 3 timer og 10 minutt.	4-8 mm knust pukk fra Franzefoss pukkverk. Jordfuktig, støver ikke, Fottråkket 2 runder etter avretting	400 mm	Ble dunka borti ved montasje av støttering på toppen av betongringen. Armlengde 0,67 m
6	Sylindren fra forsøk nr 4 ble skåret rein for stein og PU-skum som kom fra rullinga	4-8 mm knust pukk fra	400 mm	Et godt gjennomført forsøk med lite

	før montasje i rigg på forsøk 4 ble skåret bort. På ny ble sylindere rulla i ureagert PU-skum og montert i riggen. Omfyllingsmassen ble tomt mot betongen som tidligere. Herdetid i rigg 18 timer.	Franzefoss pukkverk. Jordfuktig, støver ikke, Fottråkket 2 runder etter avretting		feilkilder
7	DN 300 GRP ble montert i riggen og omfyllingsmasse ble fylt rundt. Det ble lagt 2 lag plast mot underlaget og det ble lagt under skiver slik at røret ikke skulle ha friksjon mot stålplata i bunnen.	4-8 mm knust pukk fra Franzefoss pukkverk. Jordfuktig, støver ikke, Fottråkket 2 runder etter avretting	400 mm	Armlengde 0,67 m Litt skeivtrekk på røret når armen ble trukket i. Bør ha lite påvirkning på resultat. Armlengde 0,67 m

Tabell 18: Oversikt over friksjonsforsøkene utført med PU-skum



Figur 81: Oppsett for GRP-rør i samme testrigg

Et tradisjonelt DN300 PN6 GRP rør ble brukt i stedet for skumsylinder i forsøk nr 7. Hensikten er å kalibrere målte verdier i forsøkene med PU-skum mot tradisjonell metode å bygge rørgater på, og få et sammenligningsgrunnlag.

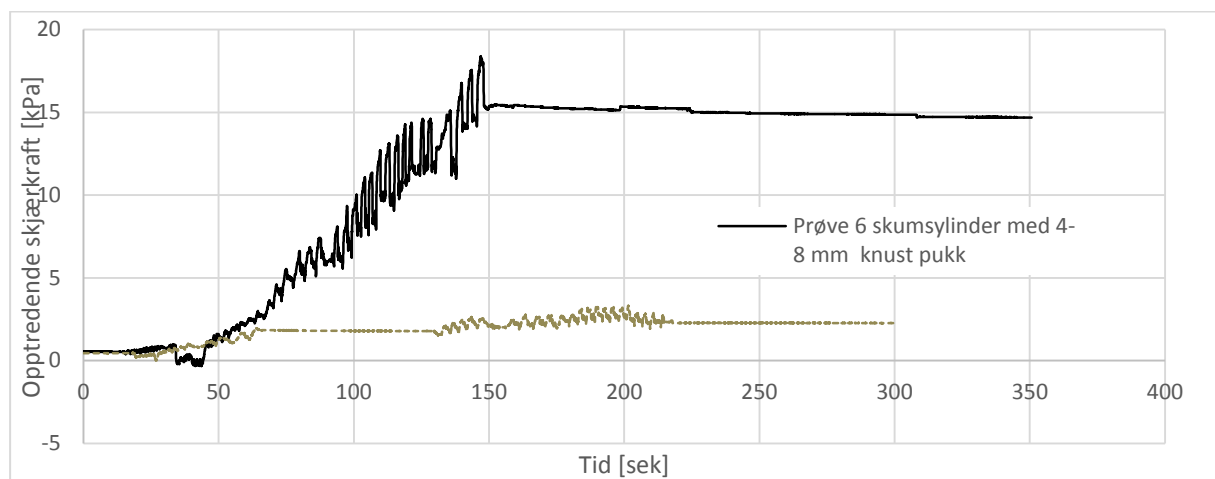
5.8 Resultater torsjonsforsøk

Torsjonsforsøkene har noe variasjon i viktige parametere fra gjennomføring til gjennomføring. Dette fordi oppsettet utviklet seg underveis basert på erfaringene som ble gjort. De viktigste parametrene er:

- hvor høyt det ble fylt omfyllingsmasser i betongringen
- lengden på armen jekken var festa i
- diameter på sylinders ytre periferi
- sylinders overflateareal

Derfor kan ikke kraften registrert i lastcella brukes direkte til å sammenligne de 7 forsøkene. Det mest oversiktlige er å beregne påført skjærspenning i grensen mellom PU-skum og jordmaterialet basert på de ulike parametrene på hver prøve. Det gir et felles referansetall på de spenningene som har oppstått. Det forutsettes uniform spenningsfordeling i beregningene som er gjort.

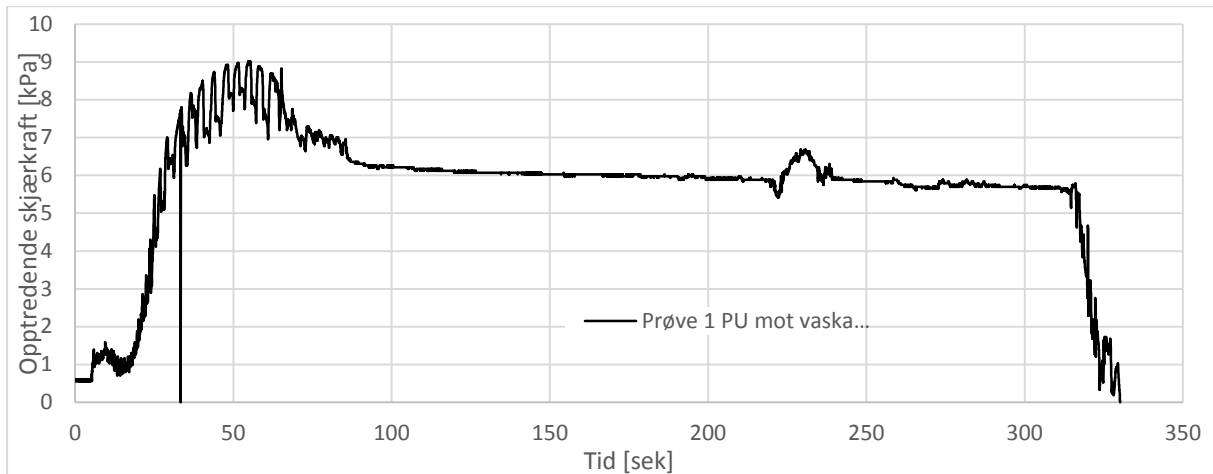
Først presenteres kort resultatene fra forsøk 6 og 7. Figur 82 viser skjærspenning og hvordan denne utvikler seg når prøvestykket dreies. Forsøk 6 var det mest vellykkede forsøket med PU-skum med minst påvirkning fra feilkilder. Forsøk 7 er forsøket med GRP-rør. De to prøvene er dreid like mange grader rundt, har samme omfyllingsmateriale, høyde på omfylling og lengde på arm og er presentert i samme diagram for å vise forskjellen mellom opptredende skjærspenning etter hvert som prøven ble dreid.



Figur 82: Resultat prøve 6 og prøve 7

5.8.1 Forsøk 1

Herdetid i rigg: ca 2 timer
Type omfylling: 0-8 mm vaska sand, manuelt komprimert med 50x50 mm planke
Høyde omfylling 0,5 m
Lengde arm: 0,81 m (egentlig 1,0 m, men ca 30 grades vinkel på trekkretninga)
Ø PU-sylinder: 25,7 cm (målt gjennomsnitt)
Kontaktareal jord-PU: 0,403 m²



Figur 83: Resultat prøve 1, opptredende skjærkraft

Begynnende bevegelse er angitt med en 0-verdi etter ca 40 sekund ved påføring av ca 7 kPa skjærkraft.



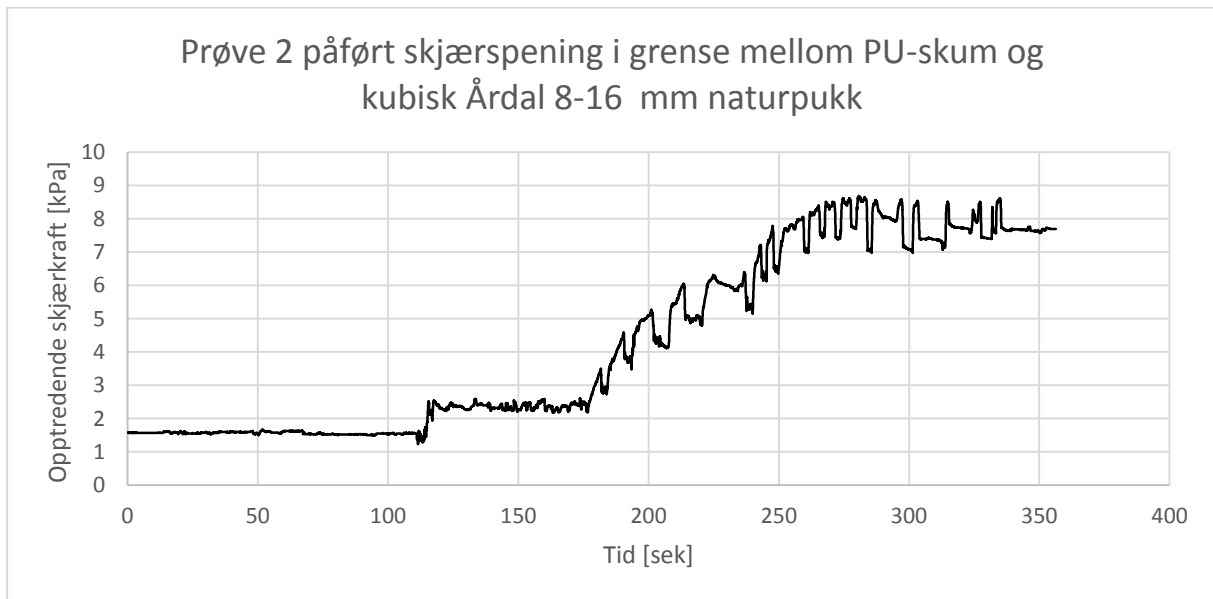
Bruddet gikk tydelig i massen 2-3 korndiametre ut fra grenseflaten PU-skumjord. Figur 84 viser bevegelsen og hvor bruddet oppstod..

Da sylinderen var tatt opp og sanda som hang på fikk tørke, var det tydelig at bruddflaten lå ytterst på de største fastlimte kornene. Innimellom disse lå det mindre korn som falt av etter hvert som prøva tørka opp. De største fastlimte kornene var synlig hele tiden mens prøva tørka opp og ble stadig mer fremtredende etter hvert som de mindre, løse korna falt av.

Figur 84: Angivelse av bruddsted prøve 1

5.8.2 Prøve 2

Herdetid i rigg:	ca 2 timer
Type omfylling:	8-16 mm vaska naturpukk, Forseth Grus AS, man. kompr. med 50x50 mm planke
Høyde omfylling	0,5 m
Lengde arm:	0,67 m
Ø PU-sylinder:	Største diameter 45,5 cm, minste 35,7 cm, snitt 40,0 cm (målt)
Kontaktareal jord-PU:	0,628 m ²



Figur 85: Resultat prøve 2, opptredende skjærkraft



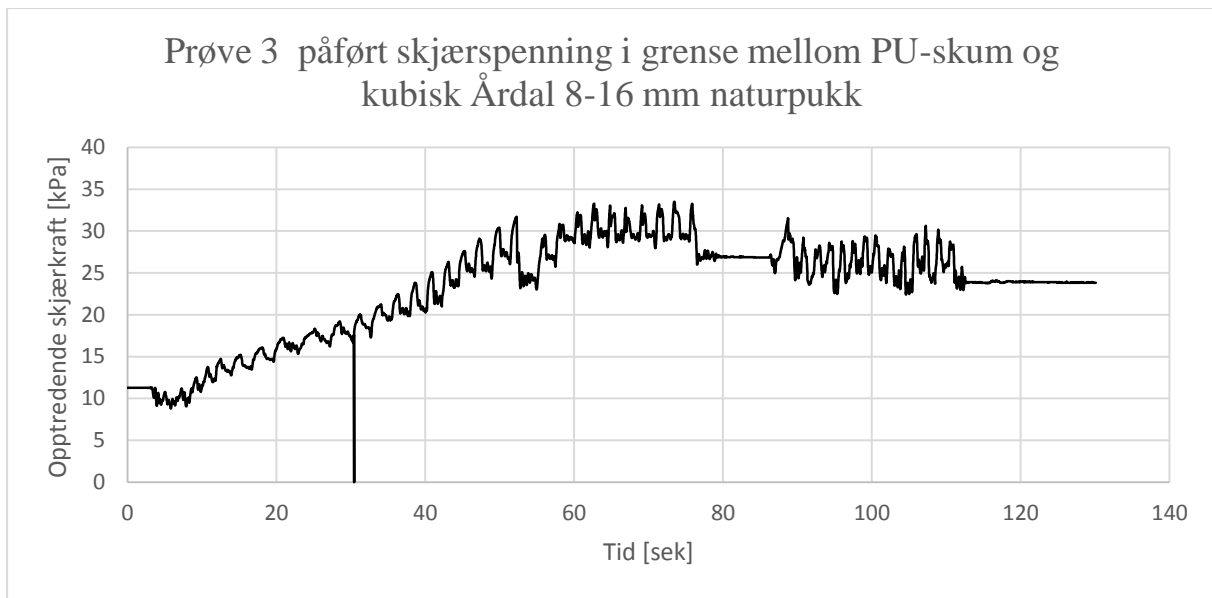
Ingen forflytning på prøvestykket men stålet i innfestinga i armen som påfører torsjon, ble bøyd. Etter dette ble vingene forsterka slik at torsjonskraften ble bedre fordelt.

Tydelig at det bygde seg opp trykk når skummet ekspanderte. Opprinnelig var toppen avretta og flat. Etter noe tid hadde pukken blitt pressa opp ca 6-7 cm på det meste i en ca 10 cm omkrets ut fra prøvestykket, se figur 86.

Figur 86: Ekspansjonen i PU-skummet presser opp omfyllingsmassene i forsøk 2

5.8.3 Prøve 3

Herdetid i rigg: 1 time og 20 minutt
Type omfylling: 8-16 mm vaska Årdal naturpukk, kubiske korn, ikke komprimert
Høyde omfylling 0,38 m
Lengde arm: 1,0 m
Ø PU-sylinder: ca 0,29 m (Ikke målt pga brudd i grenseflate nytt og gammelt PU-skum)
Kontaktareal jord-PU: 0,364 m²



Figur 87: Resultat prøve 3, opptredende skjærkraft



Prøva begynte å bevege seg ved det markerte 0-punktet etter ca 30 sekund i figur 87. Dvs skjærmotstand mot rotering på ca 17 kPa. Etter noe tid med rotasjon kom det et tydelig sprak fra prøva. I ettertid så vi at det hadde oppstått brudd PU-skummet mellom det laget som var påført og det laget som var støpt i sylinder. Dette kan skyldes for kort tid til herding.

Det var tydelig at bruddet gikk i massene med bevegelse ca 6-8 cm ut fra prøvestykket, se figur 88.

Figur 88: Anvising av bevegelsen i massene ved brudd forsøk 3

5.8.4 Prøve 4

Herdetid i rigg:	ca 18 timer
Type omfylling:	4-8 mm knust pukk fra Franzefoss Pukk Vassfjellet, fottråka to runder etter avretting på toppen.
Høyde omfylling	0,42 m
Lengde arm:	0,67 m
Ø PU-sylinder:	0,29 m (målt gjennomsnitt) 8-10 «utvekster» med tykkelse 2,0 cm
Kontaktareal jord-PU:	0,382 m ²



Figur 89: Resultat prøve 4, opptredende skjærkraft



Prøve hadde bevegelse ved det markerte 0-punktet etter ca 65 sekund på ca 4 kPa.

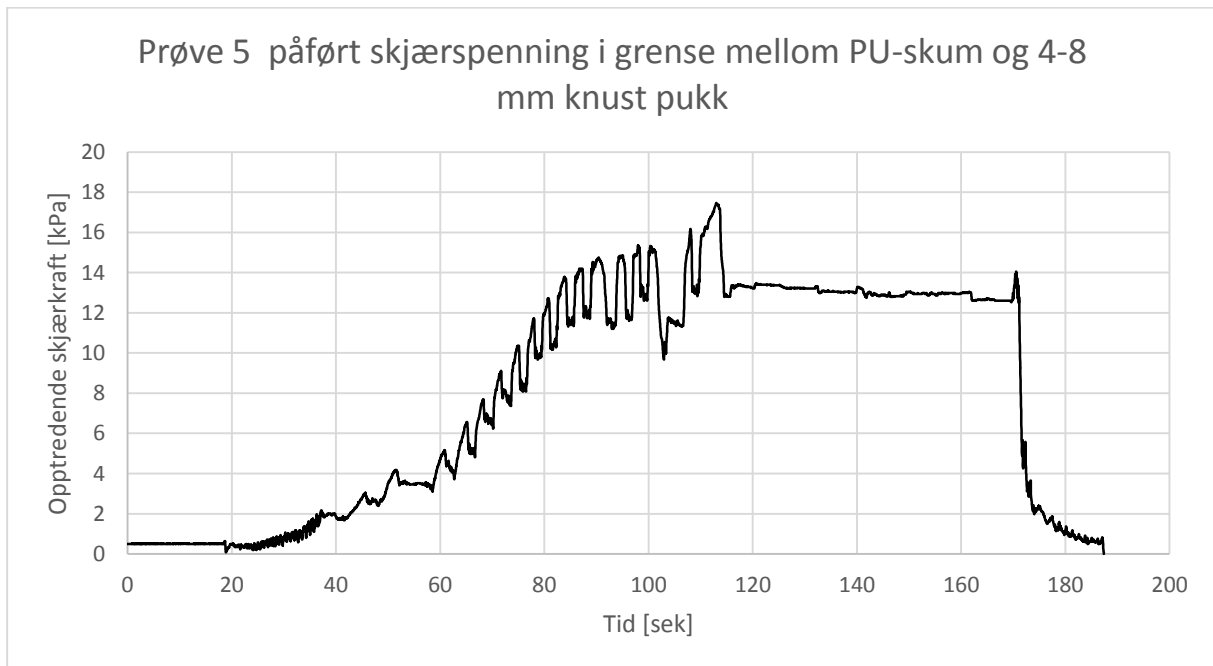
Det er tydelig at bruddet har gått i massene jmfir figur 90, typisk 0-3 kornstørrelser ut fra overflata. Overflatas ruhet kan sees i fig 90



Figur 90: Bruddanvisning i massene forsøk 4. Fig. til høyre: eksempel på ujevnheter i overflaten av sylinderen

5.8.5 Prøve 5

Herdetid i rigg: ca 3 timer
Type omfylling: 4-8 mm knust pukk fra Franzefoss Pukk Vassfjellet, fottråka to runder etter avretting på toppen.
Høyde omfylling 0,4 m
Lengde arm: 0,67 m
Ø PU-sylinder: 0,29 m (Ikke målt nøyaktig, bruker anslag basert på prøve 4 og 6)
Kontaktareal jord-PU: 0,364 m²



Figur 91: Resultat prøve 5, opptredende skjærkraft

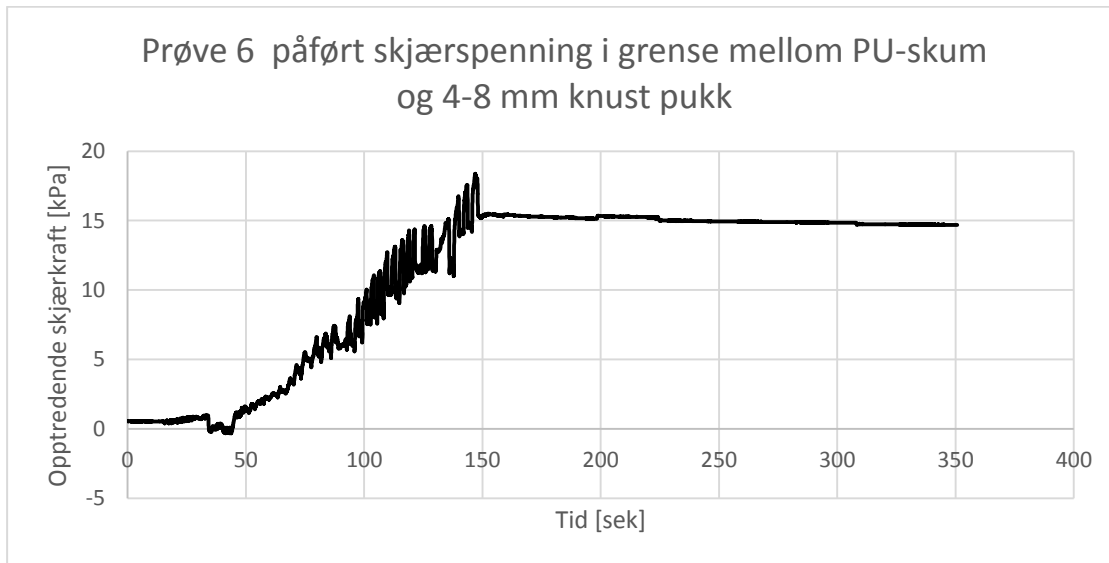
Figur 92 viser at bruddet går i omfyllingsmassen, ca 1-3 steinstørrelser ut fra overflaten.



Figur 92: Bruddanvisning forsøk 5

5.8.6 Prøve 6

Herdetid i rigg: ca 18 timer
Type omfylling: 4-8 mm knust pukk fra Franzefoss Pukk Vassfjellet, fottråka to runder etter avretting på toppen.
Høyde omfylling 0,4 m
Lengde arm: 0,67 m
Ø PU-sylinder: 0,28 m (målt gjennomsnitt) 6-7 «utvekster» med ca tykkelse 2,0 cm
Kontaktareal jord-PU: 0,354 m²



Figur 93: Resultat prøve 6, opptredende skjærkraft

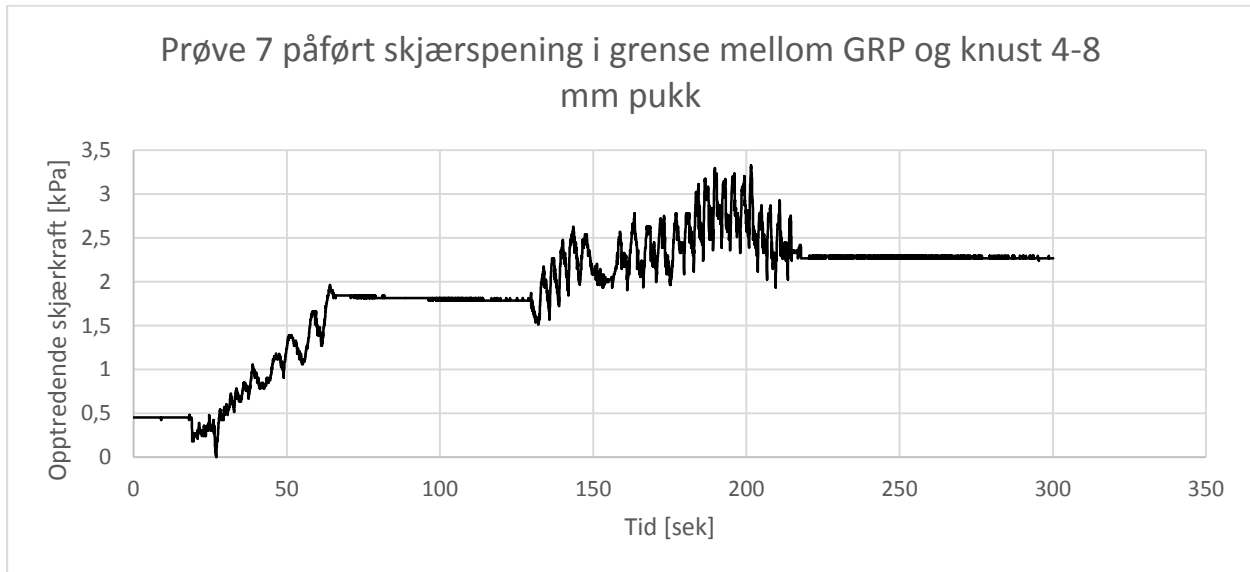
Figur 94 viser at bruddet gikk i omfyllingsmassen med bevegelse ca 3-4 cm ut fra grenseflaten.



Figur 94: Bruddanvisning forsøk 6

5.8.7 Prøve 7 Ø 300 mm GRP mot 4-8 mm knust pukk

Herdetid i rigg: ikke relevant
Type omfylling: 4-8 mm knust pukk fra Franzefoss Pukk Vassfjellet, fottråka to runder etter avretting på toppen.
Høyde omfylling: 0,4 m
Lengde arm: 0,67 m
Ytterdiameter GRP: 0,325 m (målt)
Kontaktareal jord-GRP: 0,408 m²



Figur 95: Resultat prøve 7 GRP, opptredende skjærkraft

Røret beveget seg ved påføring av i underkant 2 kPa skjærspenning ved overflaten, noe mer motstand ble mobilisert når bevegelsen fortsatte. Figur 96 viser at bruddet har gått i grensen mellom GRP og omfyllingsmasser. Det var få tegn til bevegelse i kornene utenfor grenseflaten rør-pukk. Det ble observert noe horisontale radielle bevegelser i røret trolig fordi innfestinga av armen på røret førte til en ujevn påføring av dreiemoment.



Figur 96: Bruddanvisning forsøk 7 GRP

5.9 Diskusjon og feilkilder

5.9.1 Feilkilder

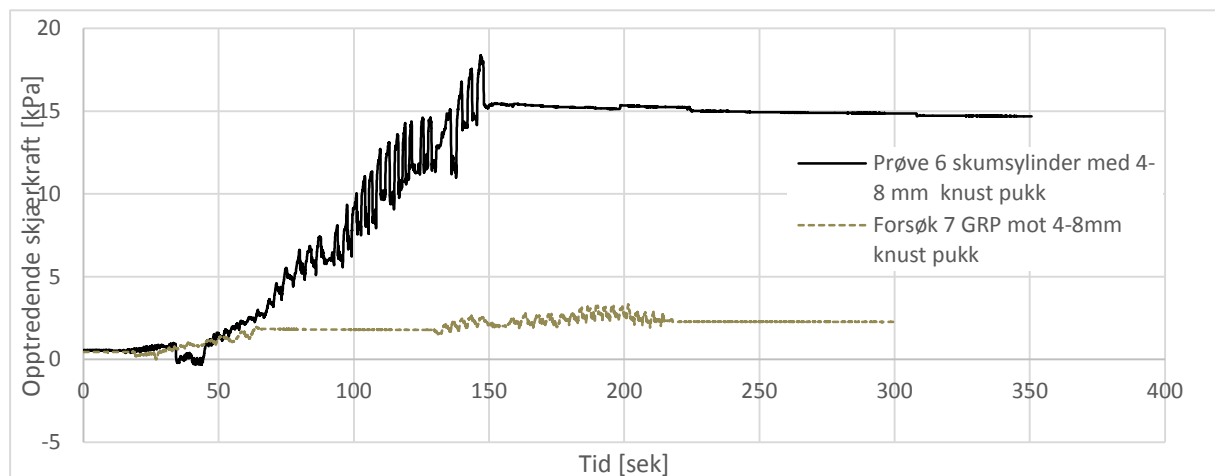
Aktuelle feilkilder i forsøkene er:

- friksjon mot akslingen som holder sylindren og armen i riktig posisjon i toppen
- Innfestinga av jekk og lastcelle var plassert slik at trekrafta på armen ikke var retta normalt på armens akse, men med en vinkel ca 81 grader. Dette gir en sideveis kraftkomponent på prøva som kan gi noe mere friksjon og litt skeivtrekk på prøvene
- Ikke alle sylindrene som ble støpt var ikke helt sirkulære. Prøve nr 2 ble kontrollmålt før den ble satt inn i riggen og hadde en diameter på 25,2 cm i en retning og 24,1 normalt på denne. Dette har trolig liten betydning ettersom prøvene får en ujevn form når de rulles i skum og dette ikke fordeler seg helt likt.

Lab-teknikkere og andre sakkyndige som var med på gjennomføringene, anslår labbefekter på grunn av effektene nevnt over til 10-15 % økt motstand mot at prøven skal dreie.

- Ved rotasjon av prøven kunne armens innfesting på prøvestykke butte mot toppringen som holdt prøvestykket i riktig posisjon og dreie denne ringen med rundt.

De to forsøkene med størst verdi er forsøk 6 og 7. Det er disse to forsøkene det var best kontroll på laboratorie-effektene og det er disse som viser forskjellen på å bruke omfylling med PU-skum og tradisjonell byggemetode. Anslagsvis utgjør labb-effekter 10-15 % av friksjonsmotstanden mot at prøva skal rotere rundt. Dette gjelder begge prøver og dermed er de gjort under så like forhold som mulig. Figur 97 viser opptredende skjærkraft ved dreining av prøven ca 15 grader. Denne viser at prøven med PU-skum mobiliserer en stadig større motstand mot bevegelse jo mer den dreies.



Figur 97: Opptredende skjærkraft ved rotering av prøvestykke, forsøk 6 og 7

Målet med betongringen var å ta vare på trykket som skummet satte opp når det ekspanderte. Dette var spesielt synlig i forsøk nr 2 der skummengden som ble brukt i pukken var betydelig større enn i de andre forsøkene, der prøven bare ble rullet i PU-blanding. Grunnen til at det ble valgt å ikke fortsette med fremgangsmåten i forsøk nr 2 med mye skum som setter opp et

stort trykk i massen, er en usikkerhet på hvordan dette trykket vil utvikle seg over tid. Trolig vil fryse og tineprosesser føre til at trykket utjevnes noe over tid og at det ikke er riktig å regne med full effekt av det trykket som skummet setter opp. I forsøk 4 til 7 var tykkelsen på laget med skum som ekspanderte etter rulling i PU-materialet, i str. orden 0,5-1.5 cm og det er derfor grunn til å tro at det radielle utadretta trykket pga skumekspansjon var lavt i disse testene. Dermed utvikler det seg spenninger i jorda først når den ujevne overflaten begynner å bevege seg aksielt eller radielt.

I alle de 5 forsøkene med PU-skum der det oppstod brudd, har bruddet gått i selve jordmassen, ca 1-4 kornstørrelser ut fra grenseflaten. Manuell bevegelse av armen som dreier prøvene etter gjennomført forsøk, viser også at etter et brudd i massen der sylindere har rotert og stoppet, stabiliserer omfyllingsmassene seg igjen og har på ny en kapasitet til å motstå bevegelse. Det betyr at det er fortsatt igjen styrke etter at et brudd har gått.

Det er litt uvisst hvorfor prøve nr 4 viser så mye bedre resultat enn de tre andre prøvene med knust 4-8 mm pukk. Muligens har innfestinga av armen på prøvestykket hekta borti toppringen som holder prøven på plass og dreid denne med rundt. Det ville føre til større motstand mot dreining enn om bare prøva dreies rundt.

Ved videre gjennomføring av forsøk med dreining av PU-sylindre må det inn en deformasjonsmåler som kan fastslå når bruddet i massene går. I dette materialet er bruddlasta markert når den er kjent basert på filming av gjennomføringene. I noen av forsøkene mangler det data på når prøven beveget seg første gang

Det ble gjort forsøk med å helle ureagert PU-materiale i en bønne pukk og i en bønne sand. Etter et par timer ble materialet trykket på manuelt og hadde en sprø oppførsel. Etter to dagers herding ble det trykket på nytt på de samme prøvene og nå viste materialet større styrke og var ikke på langt nær så sprøtt. Dette viser at herdetid er en viktig faktor når skumets styrke skal vurderes.

Prøve 3 ble kjørt etter bare 1 time og 20 min herding. Da oppstod det brudd i heftflaten mellom gammelt og nytt PU-skum fra ca 10 cm under overflaten og helt ned til bunnen. Dette skjedde ikke med noen av de andre prøvene og understreker viktigheten av herdetid.

5.9.2 Metode for beregning av glidestabilitet

Det er tydelig at bruddet i forsøkene går i selve jord-massen 1-4 kornstørrelser ut fra grenseflaten Dette betyr at det er skjærstyrken i jorda som blir dimensjonerende ved beregning av glidestabilitet for rørgatene der det er brukt PU-skum som omfylling. Skjærstyrken kan relativt enkelt måles med en triakstest slik at prosjekteringa kan skje med de styrkeparametrene som faktisk opptrer på stedet. I geoteknisk prosjektering av drenert og/eller lang tids skråningstabilitet brukes blant annet $\alpha\phi$ -analyser.

Det må vurderes om sikkerhetsfaktor på 1,5 som dimensjonerende faktor for skråningsstabilitet er et for strengt krav i forhold til praksis i andre sektorer i samfunnet. Erfaring fra sikring at tunelltipper tilsier at det skal bare noen få graders endring i skråningshelningen til før tippen står stabilt.

Vurdering av oppfylling av NVEs krav til rørgate

For at metoden med bruk av PU-skum skal godkjennes må en prosjektert rørgate tilfredsstillende følgende tre hovedkrav:

1. Røret må sikres mot oppdrift ved høy grunnvannstand med sikkerhetsfaktor på 1,1
2. Røret skal sikres mot glidning med sikkerhetsfaktor på 1,5
3. Utadretta kraft ved avvinkling i muffen skal motvirkes av en stabiliserende kraft med sikkerhetsfaktor på 1,5

Pkt nr 1 tilfredsstilles ved å legge på tilstrekkelig vekt med stedlige jord-masser oppå PU-strengen og å holde volumet av PU-skum så lavt som mulig. Løsningen med å forskåle med PE-plater på en eller begge sider av røret bør brukes der den utgravde grøfta blir bredere enn prosjektert tversnitt av PU-skummet.

Forsøkene viser at glidemotstanden er betydelig større når røret skummes inn i PU enn ved tradisjonell legging med pukk som omfyllingsmasser. Det er skjærstyrken i jord som må legges til grunn og det må regnes med en periferi som tar opp i seg alle ujevnheter, utvekster og innsynkinger på overflaten. Ved påføring av PE-skum direkte mot grøftevegg vil store steiner som finnes i veggen limes fast til skummet. Det vil ha til dels stor betydning for størrelsen på periferien. Dersom metoden med friksjonsfaktor skal benyttes for beregning av stabilitet, kan det regnes med friksjon på et betydelig større overflateareal pr løpemeter rør og en betydelig større friksjonsfaktor enn dagens metode gjør.

Legges det til grunn et DN 500 mm GRP-rør med 6 meters lengde med overflateareal på 9,42 m² og vedheft på 170 kN/m², gir det en samla kraftresultant som skal til for å dra røret løs fra skummet på ca 1 600 kN eller 163 100 kg. Det fremstår derfor som lite sannsynlig at et GRP-rør som veier 21-35 kg skal løsne fra skummet pga aksielle krefter i helning. Derfor er det valgt å se bort fra grensesjiktet skum-rør i forsøkene.

Basert på dette er det mulig å tilfredsstillende en sikkerhetsfaktor på 1,5 for glidestabilitet.

PU-skummet har styrke og fasthet til å tåle den utadretta krafta som oppstår i muffen med vinkelavvik. Det gir også strekkfaste egenskaper til rørtyper som til nå ikke har vært strekkfaste.

6 Konklusjon

6.1 Byggetoder for rørgater og bruk av omfyllingsmasser

Basert på observasjoner og intervjuer synes det å være en trend at det brukes stadig mer masser med til dels høyt finstoffinnhold ved omfylling rundt rørgater. Dette har bakgrunn i pris og tilgjengelighet, men har også en virkning på hvor mye sigevann som samles opp i grøfta. Masseprøvene som er tatt av omfyllinga på fire rørgater viser at stedlige masser ikke i vesentlig grad skiller seg ut på finstoffinnhold sammenlignet med det som allerede brukes.

GRP og PE-rør er avhengige av god støtte fra omfyllinga for å hindre ovalitet og det må derfor stilles krav til komprimeringsevne i den massen som brukes fra fundamentet og opp til 60% av diameter. Over dette kan det brukes masser med høyere finstoffinnhold og lavere bæreevne, så sant det ikke skader rørene. Duktile støpejernsrør har en stivhet som gjør at de tåler større belastninger fra masser med lavere komprimeringsevne og bæreevne så lenge fundamentet og fundamentsonen er av god kvalitet. Stedlige masser med kornstørrelser opp til 60 mm kan brukes i omfyllingssonen.

Dersom det må inn et bend på rørgata, brukes det vanligvis betongklosser til å stabilisere bendet. Erfaring fra Jora og Tverråga kraftverk viser at det er mulig å bruke strekkfaste bend og strekkfaste duktile støpejernsrør med en forankringslengde med friksjon mot omfyllingsmassene, til å stabilisere bendet uten bruk av betongklosser. Dette kan redusere byggekostnadene på vanskelig tilgjengelige plasser betydelig. Basert på intervjuer virker det ikke som at norsk rådgiverbransje har hatt vilje til å ta inn over seg denne typen løsninger for å redusere byggekostnader og ta i bruk materialegenskapene som finnes i rør og omfyllingsmasser.

Friksjonsforsøkene viser at friksjonsfaktoren ligger i området mellom 0,50 og 0,58 basert på de forsøkene som er gjort. Dette er noe lavere enn forventet, men det er tydelig at når spenningene øker (vekta går opp) øker friksjonsfaktoren. Det er derfor grunn til å anta målte verdier er i den konservative enden av skalaen. Stedlige masser og masser med finstoffinnhold har minst like gode og til dels bedre egenskaper enn pukk, når det kommer til friksjon mot rørveggen og dermed forankring av rørgater på friksjon.

Kornfordelingskurvene viser at tre av de fire stedlige maseprøvene har en grovere kornfordeling enn den fineste tilkjørte massen som er brukt på de studerte rørgatene. Det tilsier at stedlige masser har minst like gode egenskaper som de massene som kjøpes inn og tilkjøres anlegg i dag.

Basert på forsøkene og observasjonene er det mulig å bruke stedlige masser rundt rørene i mye større omfang enn det gjøres i dag. Dette vil kunne redusere byggekostnader og gi bedre utnyttelse av de tilgjengelige ressursene. Bruk av strekkfaste bend med forankring i en beregnet lengde med tilstøtende strekkfaste rør og bruk av stedlige masser rundt dette, bør ha betydelig potensiale til å forenkle bygging av nedgravde rørgater.

6.2 Bruk av poluyretanskum til forankring og omfylling

Basert på resultatene fra forsøka, gir bruk av PU-skum som omfylling rundt rør i nedgravde rørgater, en glidestabilitet på rørene som er like god og bedre enn dagens praksis med bruk av pukk og sorterte masser. Forsøkene indikerer skjærkapasitet i grenseflaten jord-PU-skum i str. orden 3 ganger bedre enn grenseflaten jord-GRP, ved begynnende bevegelse/rotasjon. Når prøven har rotert 15-20 grader og spenningene i jorda er mobiliseres i stadig større grad, er forholdet i str. orden 7 ganger bedre.

Ved brudd er det tydelig at bruddet går i selve omfyllingsmassen og ikke inne ved grenseflaten. Dvs det er ikke friksjon mellom jord og et rør/PU-materiale slik tradisjonell beregningsmetodikk legger til grunn, men et brudd som går i selve jordmaterialet. Det betyr at dimensjoneringskriteriet for glidestabilitet er skjærstyrken i selve jordmaterialet og det er stabiliteten i selve skråningen som blir dimensjonerende for hvor bratt rørlegningen kan bygges. a ϕ analyse kan benyttes for beregning av lang tids stabilitet.

PU-skummet kan sette opp et betydelig trykk mellom grøfteveggene som øker hovedspenningene og dermed skjærstyrken til jorda. Det er allikevel usikkert hvordan disse spenningene svekkes over tid dersom jorda utsettes for fryse-tine-sykluser og/eller mye tilgang på vann. For langtidsstabilitet anbefales det derfor å være forsiktig med å tillegge økte spenninger pga skummets ekspansjon for mye vekt i stabilitetsberegningene.

2/3 av trykkstyrken er mobilisert etter bare 2% tøyning. Det betyr at en relativt liten deformasjon setter opp nok motstand til å bære rør og vannet inni.

Bruk av PU-skum gir innenfor visse grenser strekkfaste egenskaper til skjøter som GRP og duktile rør ellers ikke ville hatt.

Det må forskes mere på spenningsfordelingen i skummet over en rørskjøt for å kunne beregne deformasjonene ved horisontal og vertikal avvinkling.

Dersom det er behov for større styrke/stivhet i PU-materialet kan dette økes betydelig i forhold til verdiene målt i disse forsøkene ved å øke PU-skummets densitet.

6.3 Endring av regelverk

Det skal vurderes om det er behov for å justere dagens regelverk basert på det som er observert og kommet fram i arbeidet med intervjuer, befaringer og resultatene av forsøkene.

Regelverket og NVEs veileder synes å være romslig nok relatert til det som er observert. NVE har godkjent løsningene på Jora og Tverråne og det er mulig å bygge med stedlige masser som omfylling og å utnytte egenskapene til strekkfaste skjøter. Det som bør endres er bransjens praksis og vilje til å utnytte materialer og å standardisere løsninger. Det kan virke som det ikke er i konsulentenes interesse å forenkle for mye, da dette reduserer mengden arbeid og dermed konsulentenes inntekt.

6.4 Videre arbeid

I det videre arbeidet bør det studeres om kravene til skråningstabilitet er for strenge når det brukes PU-skum og det kreves en sikkerhetsfaktor på 1,5.

Penstock BV planlegger bygging av en 50 meter lang testrørgate i desember 2015. Basert på erfaringen med forsøkene gjort i denne oppgaven bør det fokuseres på følgende:

- Hvor store steiner limer seg fast til skummet og hvor langt trenger skummet inn i jordmassene. Dette har betydning for størrelsen på periferien på grensesnittet rør-skum
- Måling av hvordan distribusjonen av spenninger fordeler seg når tverrsnittet utsettes for strekk- og momentkrefter. Dette har betydning for å beregne tøyningene i et påkjent rørtversnitt.
- Ved gjennomføring av flere forsøk med dreining av PU-sylindre må det inn en deformasjonsmåler som kan fastslå når bruddet i massene går.

Kilder

- Bergsaker, H., Bårgard, E. H. (2012) *Forankring av rørgater i bratt terreng*, Trondheim: masteroppgave ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet (NTNU)
- Bergsaker, H. (2011) *Nedgravde rørgater i bratt terreng*, Trondheim: prosjektoppgave ved NTNU
- Brødrene Dahl [1], Informasjonsfolder *Frå rist til turbin*, VA-konsept: vasskraft, utgåve 10 - nynorsk, 24 sider.
- Bossel, E., Haugen, M. B. (2013) *Forankring av rørgater i bratt terreng*, Trondheim: masteroppgave ved NTNU
- Bossel, E., Haugen, M. B. (2012) *Stabilitet av nedgravde rørgater, felt og friksjonsforsøk*, Trondheim: prosjektoppgave NTNU
- Buderus, *Leggeanvisning for duktile rør med utvendig sement*, ZMU, Buderus/Brødrene Dahl AS, VA-avdeling, folder 12 sider.
- Buzzi, et al (2008), *Structure and properties of expanding polyurethane foam in the context of foundation remediation in expansive soil*, Mechanics of Materials 40 (2008), University of Newcastle, Australia
- Bårgard, E. H. (2011) *Rørgater i bratt terreng*, Trondheim: prosjektoppgave NTNU
- Damsikkerhetsforskriften (2010), Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg. Tilgjengelig fra: www.lovdata.no [nedlastet 20.06.2015]
- Elstad, I., Hartmann, R., Molle, G., Bachke, D. (2011) *Retningslinjer for stenge og tappeorganer, rør og tverrslagsporter*, Norges Vassdrags og energidirektorat (NVE), Oslo: NVE
- Emdal, A. (2009), Introduksjon til geoteknikk, NTNU Geoteknikk, Trondheim: kompendium
- Flowtite, *Installation guide for buried pipes – AWWA*, Flowtite Technology AS, 72 sider, Sandefjord Tilgjengelig fra <http://www.flowtite.no/Installation-General-installation-Buried.aspx>, 15.11.2015
- Grande, L., Emdal A., Nordal S. (2014), Geoteknikk beregningsmetoder, NTNU Geoteknikk, Trondheim: kompendium
- Grøttå, L, 2012, *Vannkraft 360 symposium, informasjon fra NVE seksjon for damsikkerhet*, Oslo: NVE
- Hallingplast [1], *FDV dokument: PE80/PE100/RC+ trykkrør*, 2 sider, Hallingplast AS, hentet fra <http://www.hallingplast.no/ressursbank/fdv-dokumentasjon/> den 15.11.2015.
- Hallingplast [2], *PE trykkrør - Teknisk informasjon*, 16 sider, Produktkatalog for PE trykkrør, Hallingplast AS, hentet fra <http://www.hallingplast.no/ressursbank/produktinformasjon/> den 15.11.2015

Hartmann, R. (2006+2009), *Damsikkerhet II*, kraftverksrør, ukjent utgiver

Hartmann, R. (2010) *Damsikkerhet II, luker, ventiler og rør*, Kristiansand: SWECO Norge AS

Hartmann, R. (2012) *Rørbrudd og andre former for rørsvikt*, Tilgjengelig fra: http://www.osberget.net/versions/ver/users/symposium/foredrag2012/vannkraft/Rorbrudd_Ragnar_Hartman.pdf [lastet ned 30.04.2015]

NPG Norge (2011), *Leggeanvisning for plastrør*, Nordisk plastrørgruppe, september 2011, 8 sider, hentet fra <http://www.hallingplast.no/ressursbank/veiledning/> den 15.11.2015.

Ormestad, H. (2009). *Friksjon: Fenomener i fysikk og teknikk*. Store norske leksikon. Hentet 13. november 2015 fra https://snl.no/friksjon%2FFenomener_i_fysikk_og_teknikk.

PAM 2008, *Produktinformasjon duktile støpejernsrør – omfyllingsmasser i ledningsgrøfter*, PAM/Saint-Gobain vann og avløp, 4 sider, hentet fra <http://www.pamline.no/index.php/teknisk-info/montasje> den 15.11.2015

PAM, nettside for rørprodusenten PAM, generell informasjon om duktile støpejernsrør, bruksområder, teknisk info og leggeanvisninger. <http://www.pamline.no/index.php/duktilt> Informasjon hentet den 14.11.2015

Svalesent, T (2015); *Bygging av nedgravde rørgater*, Trondheim: Prosjektoppgave ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU)

Vedlegg

Vedlegg 1 Kornfordelingskurver M1 til M11

Vedlegg 2 Datablad fra friksjonsforsøk GRP og duktile rør

Vedlegg 3 Oversikt over rørbrudd 2009-2014

Vedlegg 4 Terrengprofiler og grøftetverrsnitt besøkte kraftverk

Vedlegg 5 Testrapporter mekaniske egenskaper PU-skum fra Covestro

Vedlegg 1 Kornfordelingskurver M1 til M11

Materialprøve

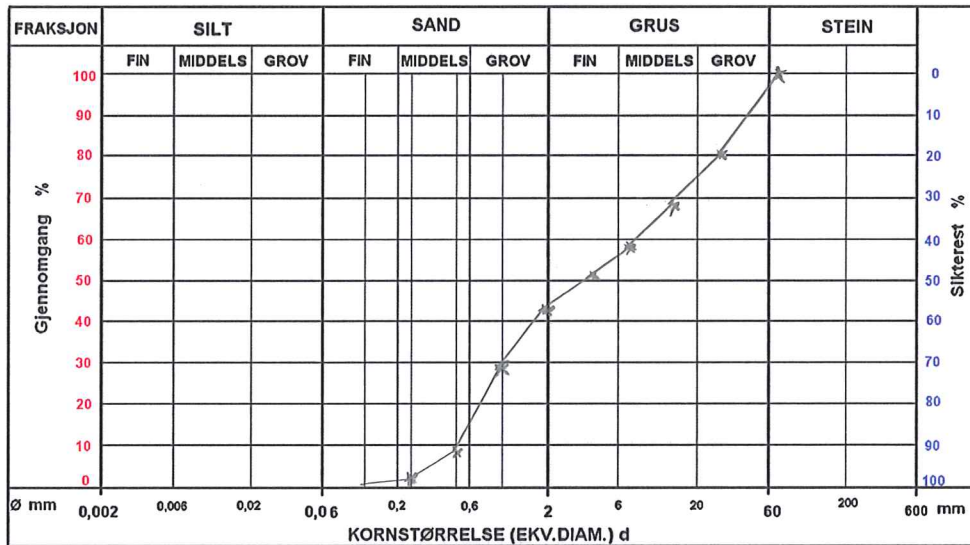
Stedlig masse fra grøttestant Tuenane

M1

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regne-ark.

Gitt:
Sikt Ø Sikterest g
45 -
40 -
31,5 -
25 -
22,4 -
20 -
16 -
8 -
4 -
2 -
1 -
0,5 -
0,25 -
0,125 -
Slump -

Siktesatser	Sikt Ø mm	Sikterest g	Summert sikterest g	Sikterest %	Gjennomgang g	Gjennomgang %
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	63	0	0%	9923	100%
	20	31,5	1994	20%	7929	80%
	16		1135	32%	6794	68%
	8		917	41%	5877	59%
	4		844	49%	5081	51%
	2		850	58%	4181	42%
	1		1319	71%	2864	29%
	0,5		2252	94%	612	6%
	0,25		555	99%	57	1%
	0,125		52	100%	5	0%
	Slump		5	100%	0	0%
	Sum		9923			



$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{8}{0,65} = 12,3 \rightarrow$ middels gradet

Gradering:

Jordartsbetegnelse:

T-klasse:

Stør M1

Materialprøve

Stedlig masse fra gruffekant Tuernine 2

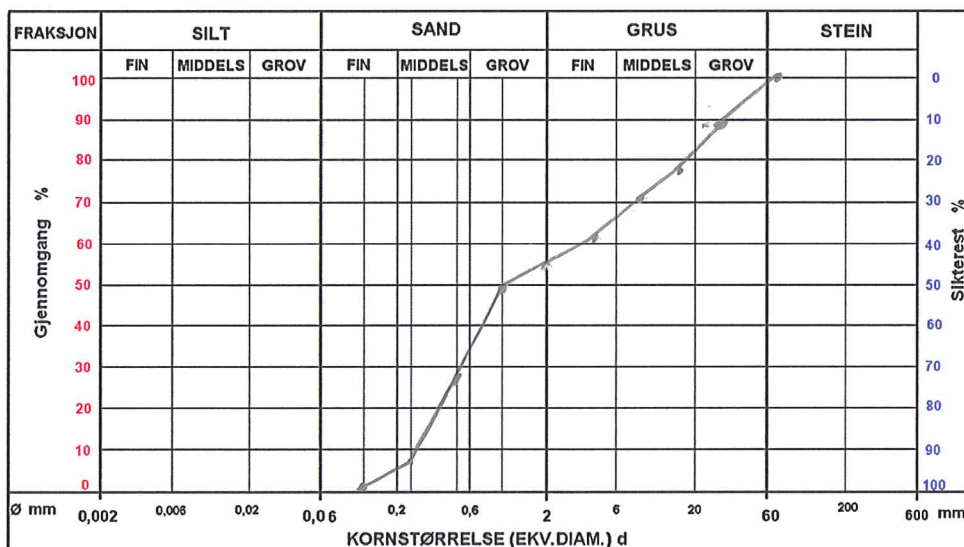
M2

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regneark.

Gitt:

Sikt Ø	Sikterest g
45	-
40	-
31,5	-
25	-
22,4	-
20	-
16	-
8	-
4	-
2	-
1	-
0,5	-
0,25	-
0,125	-
Slump	-

Siktesatser	Sikt Ø mm	Sikterest g	Summert sikterest g	Sikterest %	Gjennomgang g	Gjennomgang %
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	0	0	0	9951	100%
	20	1057	1057	11%	8894	89%
	16	1093	2150	22%	7801	78%
	8	872	3022	30%	6929	70%
	4	737	3759	38%	6192	62%
	2	703	4462	45%	5489	55%
	1	752	5214	52%	4737	48%
	0,5	2031	7245	73%	2706	27%
	0,25	2049	9294	93%	657	7%
	0,125	585	9897	99%	72	1%
	Slump	72	9951	100%	0	0%
	Sum	9951				



$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{4}{0.3} = 13.3$

Gradering: Middels gradet

Jordartsbetegnelse:

T-klasse:

Støer

Materialprøve

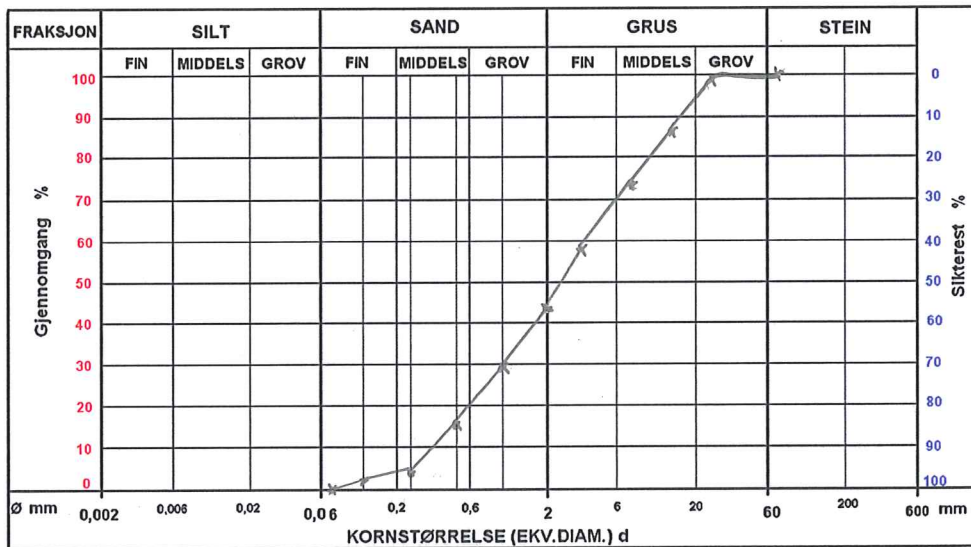
Øre halvdel av rør-Nydelve, Vestbyen 0-6 m

M3

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regne-ark.

Gitt:
Sikt Sikterest
Ø g
45 -
40 -
31,5 -
25 -
22,4 -
20 -
16 -
8 -
4 -
2 -
1 -
0,5 -
0,25 -
0,125 -
Slump -

Siktesatser	Sikt	Sikterest	Summert	Sikterest	Gjennom-	Gjennom-
m= kg	Ø	g	sikterest	%	gang	gang
	mm		g		g	%
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	0	0	0%	9939	100%
	20	70	70	1%	9869	99%
	16	1344	1414	14%	8525	86%
	8	1253	2667	27%	7272	73%
	4	1635	4302	43%	5617	57%
	2	1345	5647	57%	4292	43%
	1	1423	7070	71%	2869	29%
	0,5	1291	8361	84%	1578	16%
	0,25	1250	9611	97%	328	3%
	0,125	311	9922	100%	17	0%
	Slump	17	9939	100%	0	0%
	Sum	9939				



$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{4}{0,35} = 11,4$

Gradering:
Jordartsbetegnelse:
T-klasse:

Middels gradet

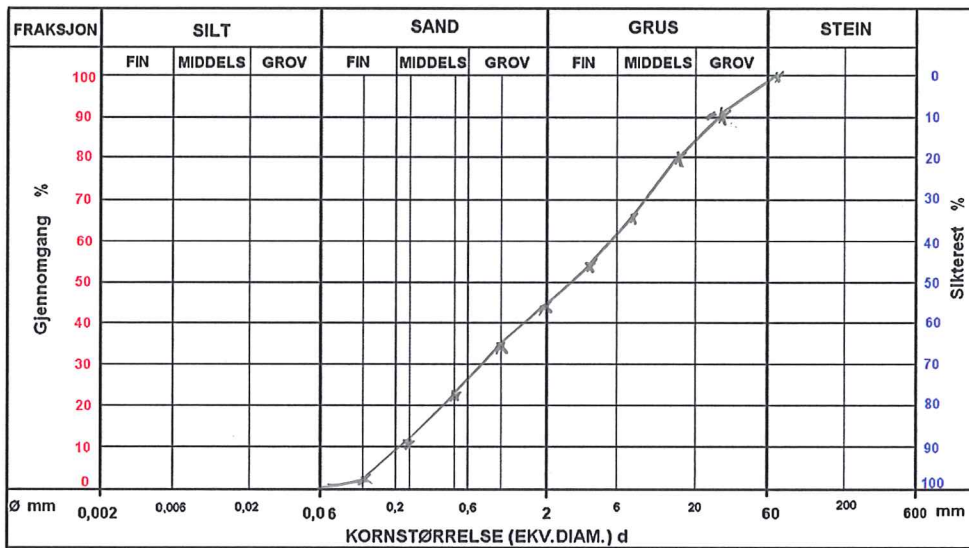
Materialprøve: Masse fra Ekle gruset, slupprasser

14

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regne-ark.

Gitt:
 Sikt Sikterest
 Ø g
 45 -
 40 -
 31,5 -
 25 -
 22,4 -
 20 -
 16 -
 8 -
 4 -
 2 -
 1 -
 0,5 -
 0,25 -
 0,125 -
 Slump -

Siktesatser	Sikt	Sikterest	Summert	Sikterest	Gjennom-	Gjennom-
m= kg	Ø mm	g	sikterest g	%	gang g	gang %
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	0	0	0%	9976	100%
	20	1038	1038	10%	8938	90%
	16	1060	2098	21%	7878	79%
	8	1316	3414	34%	6562	66%
	4	1185	4599	46%	5377	54%
	2	940	5539	56%	4437	44%
	1	1025	6564	66%	3412	34%
	0,5	1215	7779	78%	2197	22%
	0,25	1205	8984	90%	992	10%
	0,125	863	9847	99%	129	1%
	Slump	129	9976	100%	0	0%
	Sum	9976				



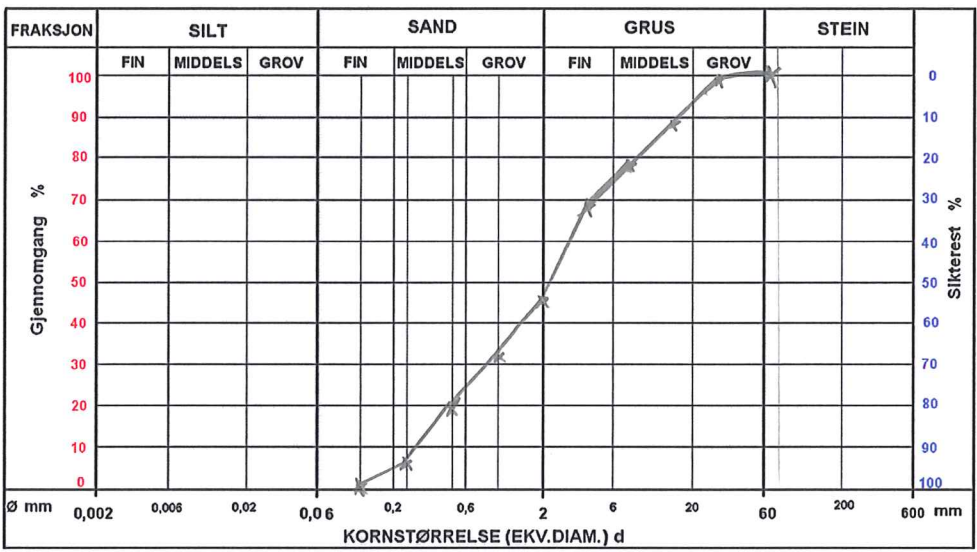
$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{5.5}{0.25} = 22$
 Gradering: Vellgradent
 Jordartsbetegnelse:
 T-klasse:

Støver godt

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regneark.

Gitt:
Sikt Sikterest
Ø g
45 -
40 -
31,5 -
25 -
22,4 -
20 -
16 -
8 -
4 -
2 -
1 -
0,5 -
0,25 -
0,125 -
Slump -

Siktesatser	Sikt Ø	Sikterest	Summert sikterest	Sikterest	Gjennomgang	Gjennomgang
m= kg	mm	g	g	%	g	%
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	0	0	0%	7032	100%
	20	55	55	1%	6977	99%
	16	764	819	12%	6213	88%
	8	845	1664	24%	5368	76%
	4	1231	2895	41%	4137	59%
	2	973	3868	55%	3164	45%
	1	966	4834	69%	2198	31%
	0,5	870	5704	81%	1328	19%
	0,25	943	6647	95%	385	5%
	0,125	363	7010	100%	22	0%
	Slump	22	7032	100%	0	0%
	Sum	7032				



$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{35}{0.3} = 117$
 Gradering: *middels gradert*
 Jordartsbetegnelse:
 T-klasse:

*Litt fuktig, brukte bare Flyg, var det overtennaset
 som var tørest. Kan ha det høy jordfuktighet*

Materialprøve... Krust pute ... Sundli kraftverk 8-16 mm

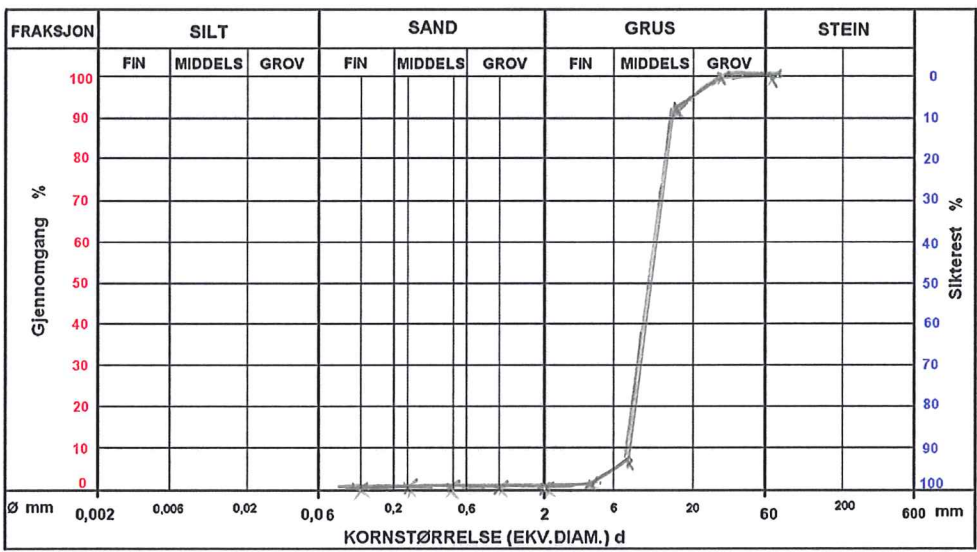
M6

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regneark.

Gitt:
Sikt Sikterest
Ø g
45 -
40 -
31,5 -
25 -
22,4 -
20 -
16 -
8 -
4 -
2 -
1 -
0,5 -
0,25 -
0,125 -
Slump -

Siktesatser	Sikt Ø mm	Sikterest g	Summert sikterest g	Sikterest %	Gjennomgang g	Gjennomgang %
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	0	0	0%	9471	100%
	20	0	0	0%	9471	100%
	16	872	872	9%	8599	91%
	8	7976	8848	93%	623	7%
	4	502	9350	99%	121	1%
	2	34	9384	99%	87	1%
	1	14	9370	99%	73	1%
	0,5	14	9412	99%	59	1%
	0,25	34	9446	100%	25	0%
	0,125	21	9467	100%	4	0%
	Slump	4	9471	100%	0	0%
	Sum	9471				

8599 91%



$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{10}{8} = 1,25$
 Gradering: Engraddet
 Jordartsbetegnelse:
 T-klasse:

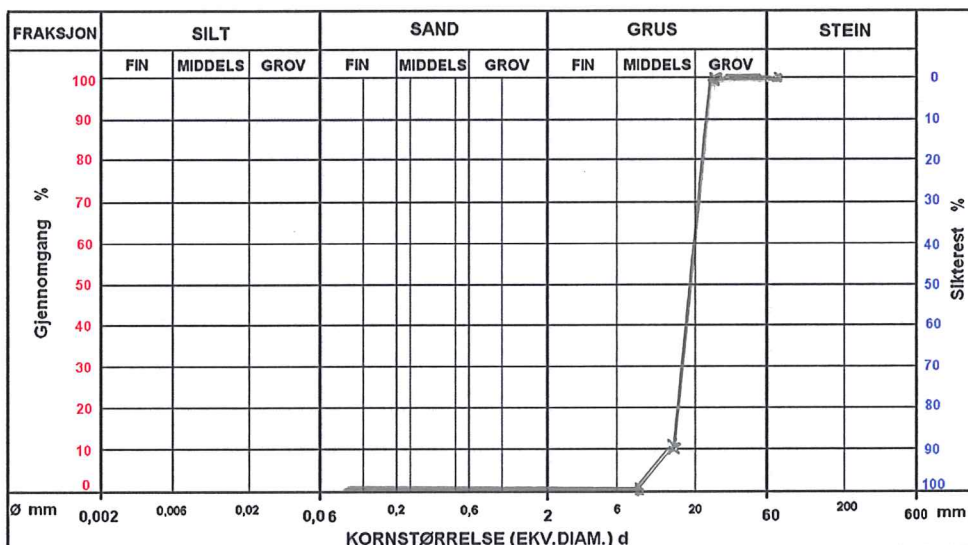
Leire

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regne-ark.

Gitt:

Sikt Ø	Sikterest g
45	-
40	-
31,5	-
25	-
22,4	-
20	-
16	-
8	-
4	-
2	-
1	-
0,5	-
0,25	-
0,125	-
Slump	-

Siktesatser		Sikt Ø mm	Sikterest g	Summert sikterest g	Sikterest %	Gjennomgang g	Gjennomgang %
m =	kg						
		45					
		40					
		31,5					
		25					
	64	22,4	0	0	0%	9992	100%
	31,5	20	0	0	0%	9992	100%
		16	8970	8970	90%	1022	10%
		8	1072	9982	100%	10	0
		4	10	9992	-	0	0
		2	0	-	-	0	0
		1	0	-	-	0	0
		0,5	0	-	-	0	0
		0,25	0	-	-	0	0
		0,125	0	-	-	0	0
		Slump	0	-	-	0	0
		Sum	9992				



$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{20}{16} = 1,25$

Gradering: $E_n = \text{gradert}$

Jordartsbetegnelse:

T-klasse:

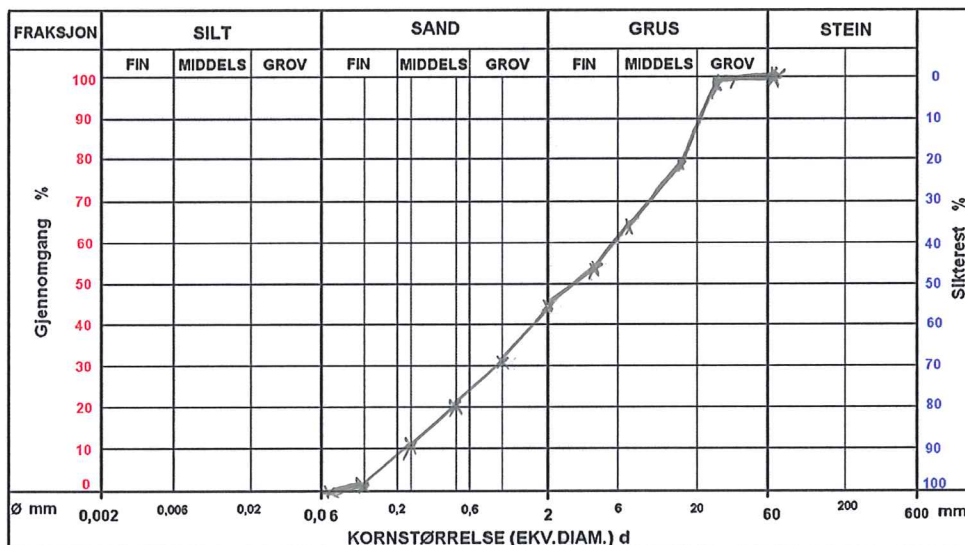
løn

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regne-ark.

Gitt:

Sikt Ø	Sikterest g
45	-
40	-
31,5	-
25	-
22,4	-
20	-
16	-
8	-
4	-
2	-
1	-
0,5	-
0,25	-
0,125	-
Slump	-

Siktesatser	Sikt Ø mm	Sikterest g	Summert sikterest g	Sikterest %	Gjennomgang g	Gjennomgang %
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	64	0	0	9937	100%
	20	315	275	3%	9662	97%
	16		1970	23%	7692	77%
	8		1380	36%	6362	64%
	4		1003	46%	5359	54%
	2		1036	56%	4323	44%
	1		1277	69%	3046	31%
	0,5		1057	80%	2009	20%
	0,25		1064	90%	945	10%
	0,125		810	99%	135	1%
	Slump		135	100%	0	0%
	Sum					



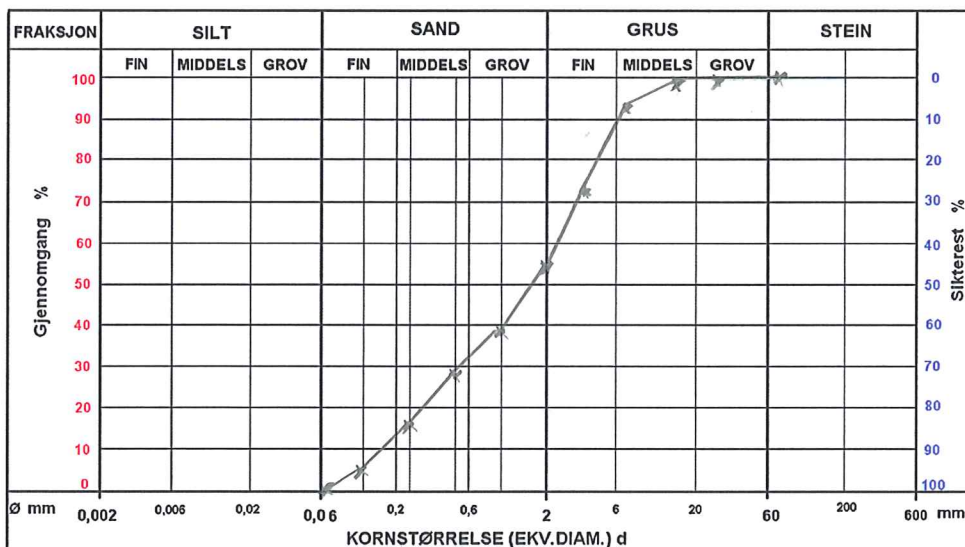
$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{6}{0,25} = 24$
 Grading: Vellgradet
 Jordartsbetegnelse:
 T-klasse:

Støver

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regneark.

Gitt:
Sikt Sikterest
Ø g
45 -
40 -
31,5 -
25 -
22,4 -
20 -
16 -
8 -
4 -
2 -
1 -
0,5 -
0,25 -
0,125 -
Slump -

Siktesatser	Sikt Ø mm	Sikterest g	Summert sikterest g	Sikterest %	Gjennomgang g	Gjennomgang %
m = kg						
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	0	0	0%	9921	100%
	20	0	0	0%	9921	100%
	16	93	93	1%	9921	99%
	8	653	746	8%	9828	92%
	4	2137	2883	29%	9175	71%
	2	1720	4603	46%	7082	54%
	1	1558	6161	62%	5318	38%
	0,5	1001	7162	72%	3760	28%
	0,25	1241	8403	85%	2759	15%
	0,125	1109	9512	96%	1518	4%
	Slump	409	9921	100%	409	0%
	Sum	9921			0	



$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{25}{0,18} = 13$
 Grading: *middels gradet*
 Jordartsbetegnelse:
 T-klasse:

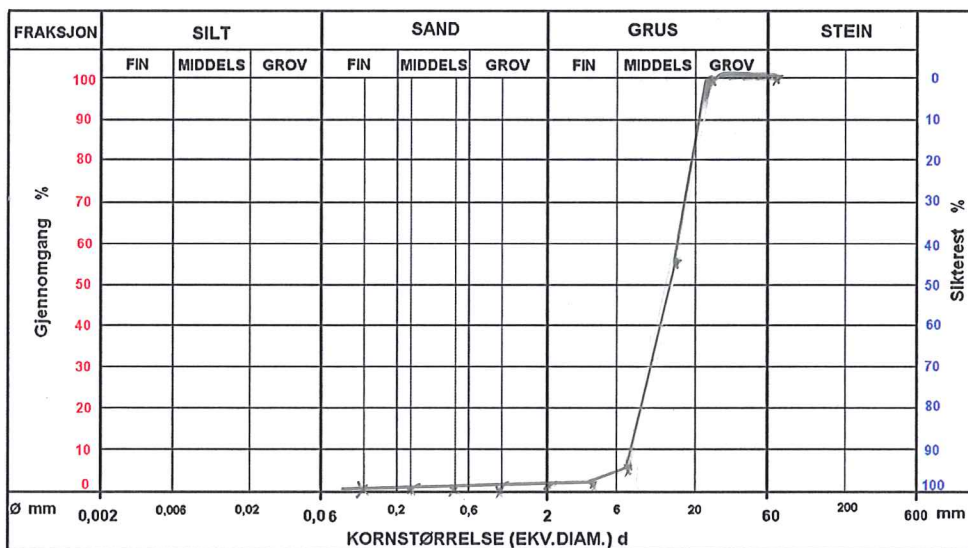
Knuste tøn

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regneark.

Gitt:

Sikt Ø	Sikterest g
45	-
40	-
31,5	-
25	-
22,4	-
20	-
16	-
8	-
4	-
2	-
1	-
0,5	-
0,25	-
0,125	-
Slump	-

Siktesatser	Sikt Ø mm	Sikterest g	Summert sikterest g	Sikterest %	Gjennomgang g	Gjennomgang %
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	0	0	0%	9902	100%
	20	0	0	0%	9902	100%
	16	4344	4344	44%	5558	56%
	8	4991	9335	94%	567	6%
	4	472	9807	99%	95	1%
	2	15	9822	99%	80	1%
	1	10	9832	99%	70	1%
	0,5	10	9842	99%	60	1%
	0,25	8	9850	99%	52	1%
	0,125	25	9875	100%	27	0%
	Slump	27	9902	100%	0	0%
	Sum					



$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{16}{8} = 2$

Gradering: Enegradet

Jordartsbetegnelse:

T-klasse:

Utsatt fukt, trolig tørr etter som pukk som har vært lagret inne over lengre tid (2-3 år)

Materialprøve

Ø 16 mm over for Sundt

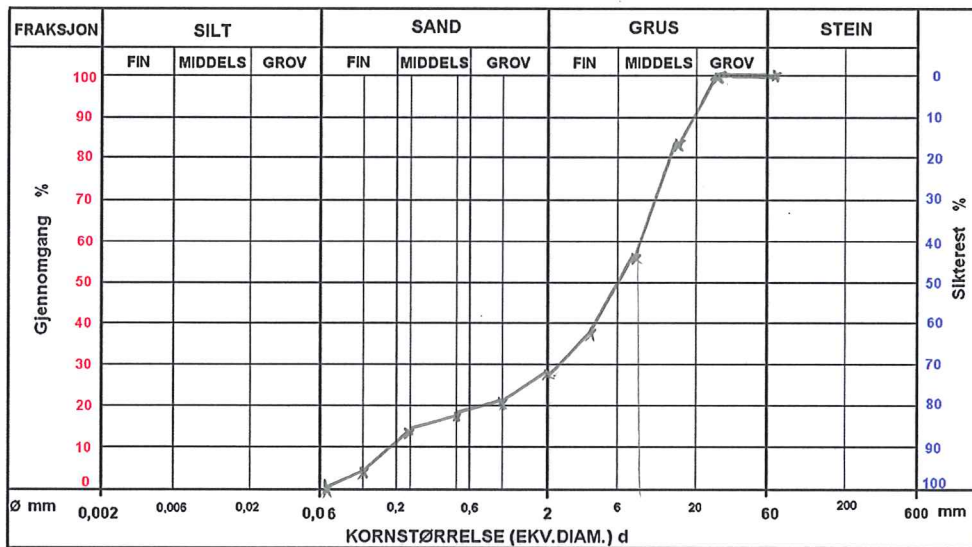
M11

Fyll ut beregnings-skjemaet for sikting eller bruk et regneark.

Gitt:

Sikt Ø	Sikterest g
45	-
40	-
31,5	-
25	-
22,4	-
20	-
16	-
8	-
4	-
2	-
1	-
0,5	-
0,25	-
0,125	-
Slump	-

Siktesatser	Sikt Ø mm	Sikterest g	Summert sikterest g	Sikterest %	Gjennomgang g	Gjennomgang %
	45					
	40					
	31,5					
	25					
	22,4	64	0	0%	8716	100%
	20	31,5	0	0%	8716	100%
	16	1491	1491	17%	7225	83%
	8	2453	3944	45%	4772	55%
	4	1446	5390	62%	3326	38%
	2	937	6327	73%	2389	27%
	1	604	6931	80%	1785	20%
	0,5	379	7310	84%	1406	16%
	0,25	392	7702	88%	1014	12%
	0,125	731	8433	97%	283	3%
	Slump	283	8716	100%	0	0%
	Sum	8716				



$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{9 \text{ mm}}{0,25 \text{ mm}} = 36 \Rightarrow$ Vellgradert

Gradering: Vellgradert

Jordartsbetegnelse:

T-klasse:

Kunst Grøslag

Vedlegg 2 Datablad fra friksjonsforsøk
GRP og duktile rør

Materiale:

M6 8-16 knust pukkl Sundli kraftverk

Serie nr

1

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sink/bitumen

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =	0,2	V endring i spenning
A	Areal prøve	60000	mm ²
g	Gravitasjon	0,00981	m/s ²
ζ	faktor lengde	-10	cm/V
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81	kg
	Lodd	20,00	kg

Informasjon om forsøket:

Første bevegelse er 7 cm, nr 2 og nr 3 er 3,5 cm slaglengde

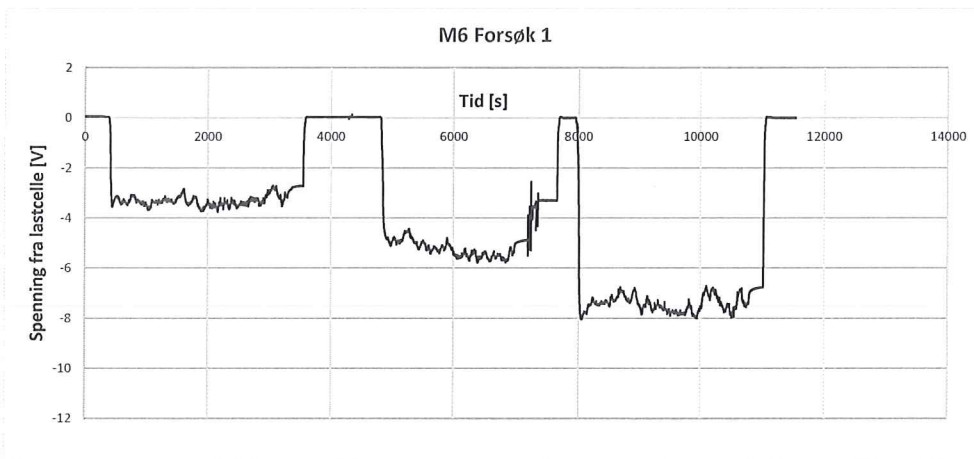
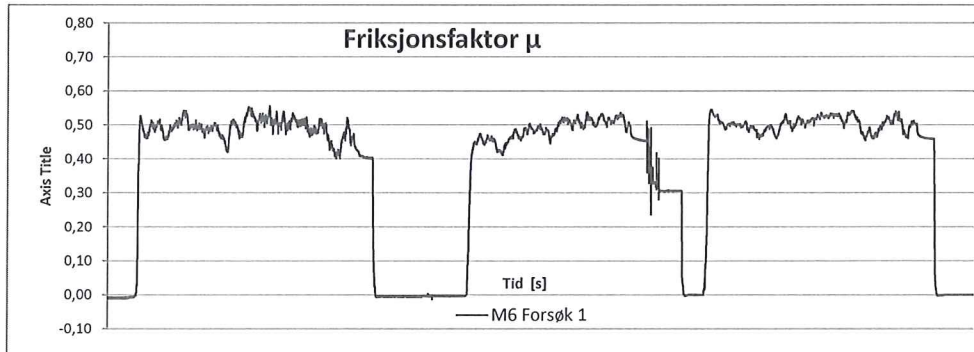
Tørt rør og tørre masser, trengte ikke sideveis støtte

M6 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkraft	Skjærspenning
Benevning	V_L [V]	V_A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			$\Delta V_A \times \zeta$	$V_L \times \lambda$		P / N	P x g	F / A
0	0,06408691	4,98100281	-0,15563964	-0,32043457	33,81	-0,01	-0,00314346	-5,23911E-08
1	0,0491333	4,99656677	0,00228882	-0,2456665	33,81	-0,01	-0,00240999	-4,01665E-08
2	0,04455566	4,98077393	-0,10299682	-0,22277832	33,81	-0,01	-0,00218546	-3,64243E-08
3	0,04516602	4,99130249	-0,17700195	-0,22583008	33,81	-0,01	-0,00221539	-3,69232E-08
4	0,04516602	4,998703	-0,11138916	-0,22583008	33,81	-0,01	-0,00221539	-3,69232E-08
5	0,04730225	4,99214172	-0,18844604	-0,23651123	33,81	-0,01	-0,00232018	-3,86696E-08
6	0,04547119	4,99984741	-0,18920898	-0,22735596	33,81	-0,01	-0,00223036	-3,71727E-08
7	0,0479126	4,99992371	-0,18920898	-0,23956299	33,81	-0,01	-0,00235011	-3,91685E-08
8	0,04882813	4,99992371	-0,12588501	-0,24414063	33,81	-0,01	-0,00239502	-3,9917E-08
9	0,04882813	4,99359131	-0,10147094	-0,24414063	33,81	-0,01	-0,00239502	-3,9917E-08
10	0,05371094	4,9911499	-0,01907348	-0,26855469	33,81	-0,01	-0,00263452	-4,39087E-08
11	0,05554199	4,98291016	-0,07400512	-0,27770996	33,81	-0,01	-0,00272433	-4,54056E-08
12	0,0604248	4,98840332	-0,09002685	-0,30212402	33,81	-0,01	-0,00296384	-4,93973E-08
13	0,0579834	4,99000549	-0,06179809	-0,28991699	33,81	-0,01	-0,00284409	-4,74014E-08
14	0,06469727	4,98718262	-0,18920898	-0,32348633	33,81	-0,01	-0,0031734	-5,289E-08
15	0,06103516	4,99992371	-0,18920898	-0,30517578	33,81	-0,01	-0,00299377	-4,98962E-08
16	0,06835938	4,99992371	-0,14190673	-0,34179688	33,81	-0,01	-0,00335303	-5,58838E-08
17	0,07171631	4,99519348	-0,17623901	-0,35858154	33,81	-0,01	-0,00351768	-5,86281E-08
18	0,07019043	4,99862671	-0,18920898	-0,35095215	33,81	-0,01	-0,00344284	-5,73807E-08
19	0,06134033	4,99992371	-0,12588501	-0,30670166	33,81	-0,01	-0,00300874	-5,01457E-08
20	0,04852295	4,99359131	-0,18920898	-0,24261475	33,81	-0,01	-0,00238005	-3,96675E-08
21	0,04608154	4,99992371	-0,18920898	-0,23040771	33,81	-0,01	-0,0022603	-3,76717E-08
22	0,05096436	4,99992371	-0,18920898	-0,25482178	33,81	-0,01	-0,0024998	-4,16634E-08
23	0,05828857	4,99992371	-0,18920898	-0,29144287	33,81	-0,01	-0,00285905	-4,76509E-08
24	0,06744385	4,99992371	-0,15411377	-0,33721924	33,81	-0,01	-0,00330812	-5,51353E-08
25	0,06866455	4,99641419	0,01602173	-0,34332275	33,81	-0,01	-0,003368	-5,61333E-08
26	0,07446289	4,97940064	-0,02059936	-0,37231445	33,81	-0,01	-0,0036524	-6,08734E-08
27	0,06896973	4,98306274	-0,04730224	-0,34484863	33,81	-0,01	-0,00338297	-5,63828E-08
28	0,07324219	4,98573303	-0,06179809	-0,36621094	33,81	-0,01	-0,00359253	-5,98755E-08
29	0,06072998	4,98718262	-0,18920898	-0,3036499	33,81	-0,01	-0,00297881	-4,96468E-08
30	0,06225586	4,99992371	-0,15487671	-0,3112793	33,81	-0,01	-0,00305365	-5,08942E-08
31	0,05249023	4,99649048	-0,1411438	-0,26245117	33,81	-0,01	-0,00257465	-4,29108E-08
32	0,04669189	4,99511719	-0,18920898	-0,23345947	33,81	-0,01	-0,00229024	-3,81706E-08
33	0,04699707	4,99992371	-0,12512207	-0,23498535	33,81	-0,01	-0,00230521	-3,84201E-08
34	0,04882813	4,99351502	-0,18920898	-0,24414063	33,81	-0,01	-0,00239502	-3,9917E-08
35	0,04943848	4,99992371	-0,17929077	-0,24719238	33,81	-0,01	-0,00242496	-4,0416E-08
36	0,05523682	4,99893189	-0,09307861	-0,27618408	33,81	-0,01	-0,00270937	-4,51561E-08
37	0,06408691	4,99031067	-0,18920898	-0,32043457	33,81	-0,01	-0,00314346	-5,23911E-08

Materiale: M6 8-16 knust pukkk Sundli kraftverk
Serie nr: 1 Forsøk nr 1

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sir



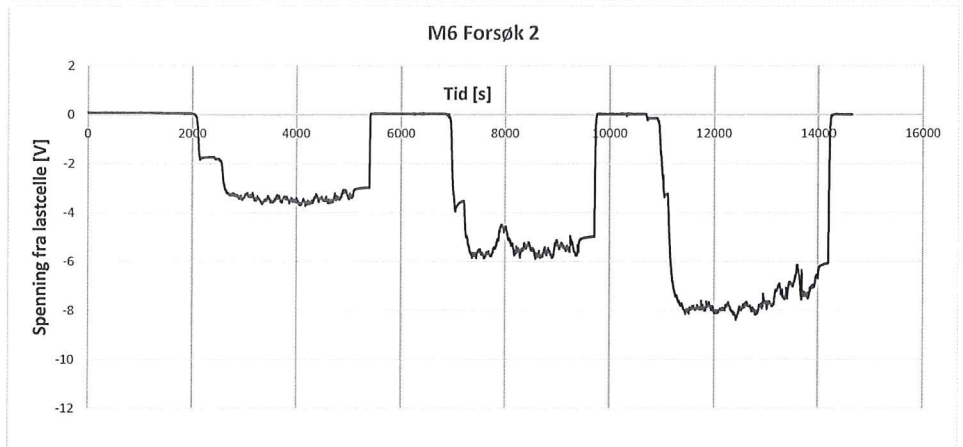
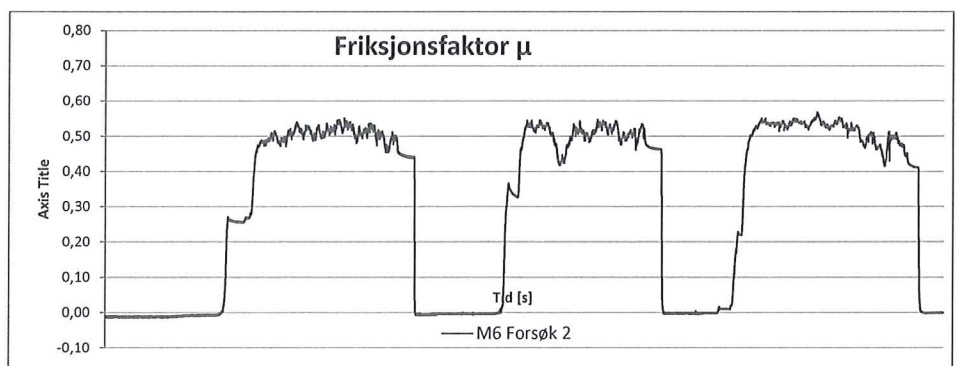
0
Første bevegelse er 7 cm, nr 2 og nr 3 er 3,5 cm slaglengde
Tørt rør og tørre masser, trengte ikke sideveis støtte
0
0
0
0

Materiale: M6 8-16 knust pukkl Sundli kraftverk

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkapp

Serie nr: 1

Forsøk nr 2

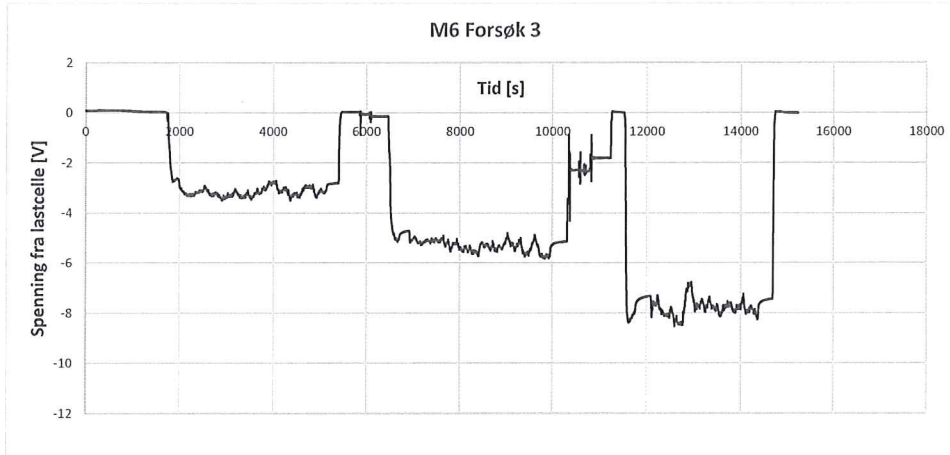
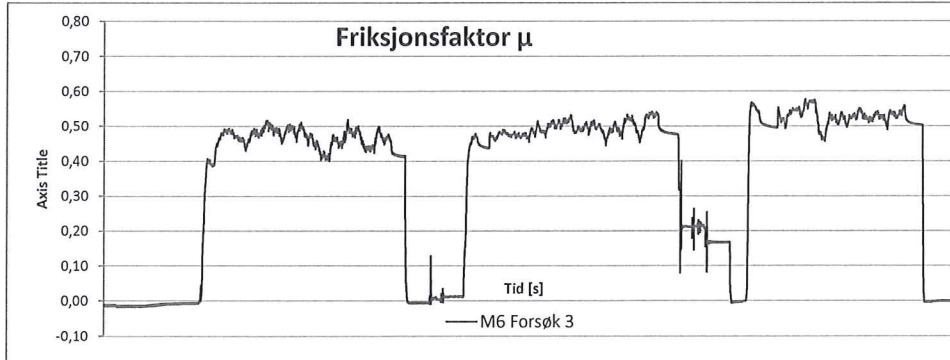


0
Forsøksserie 2 Pukk Sundli kraftverk, tørt rør, tørre masser, overskytende værforhold ca 15 varmegrader
Lengde 3,5 cm for hver pålastning, 9600 g masse + kasse + plate

0
0
0
0

Materiale: M6 8-16 knust pukkk Sundli kraftverk
Serie nr: 1 Forsøk nr 3

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe a



- 0
- 3. forsøk med pukkk fra Sundli, tørt rør, tørr pukkk 9600 g + kasse + plate + lodd 3,5 mc vandring pr pålasting
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0

Materiale:

M2 Stedlig masse Tverråne

Serie nr

2

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sink/bitumen

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =	0,2	V endring i spenning
A	Areal prøve	60000	mm ²
g	Gravitasjon	0,00981	m/s ²
ζ	faktor lengde	-10	cm/V
N	Vekt av prøve 4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd		
	Sum	13,81	kg
	Lodd	20,00	kg

Informasjon om forsøket:

Stedlig morenejord henta fra bakken ovenfor Tverråne kraftverg Nesbyen. 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
 Svært tørr jord ned mot røret som støver når man slipper den. 3,5 cm lengde på trekk

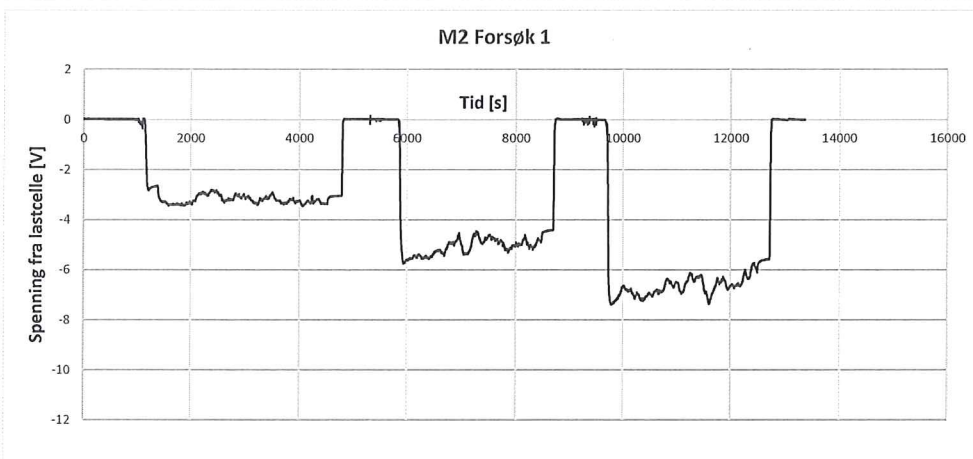
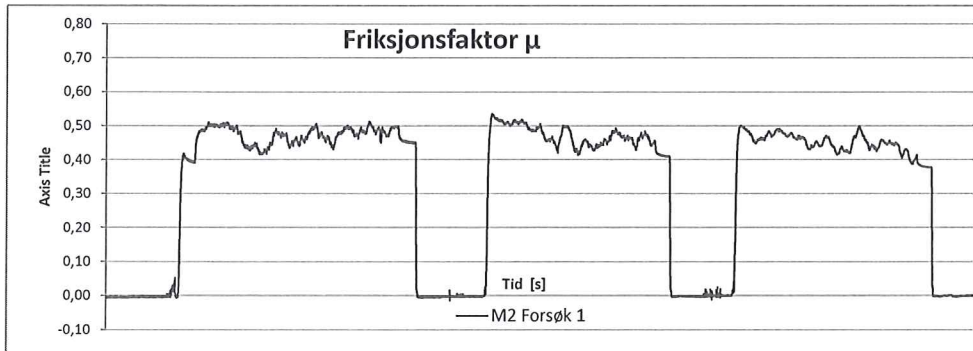
M2 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkkraft	Skjærspenning
Benevning	V_L [V]	V_A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			$\Delta V_A \times \zeta$	$V_L \times \lambda$		P / N	P x g	F / A
0	0,03051758	4,98100281	-0,15563964	-0,15258789	33,81	0,00	-0,00149689	-2,49481E-08
1	0,01403809	4,99656677	0,00228882	-0,07019043	33,81	0,00	-0,00068857	-1,14761E-08
2	0,01464844	4,98077393	-0,10299682	-0,07324219	33,81	0,00	-0,00071851	-1,19751E-08
3	0,01861572	4,99130249	-0,17700195	-0,09307861	33,81	0,00	-0,0009131	-1,52184E-08
4	0,02929688	4,998703	-0,11138916	-0,14648438	33,81	0,00	-0,00143701	-2,39502E-08
5	0,03601074	4,99214172	-0,18844604	-0,18005371	33,81	-0,01	-0,00176633	-2,94388E-08
6	0,03448486	4,99984741	-0,18920898	-0,17242432	33,81	-0,01	-0,00169148	-2,81914E-08
7	0,03479004	4,99992371	-0,18920898	-0,1739502	33,81	-0,01	-0,00170645	-2,84409E-08
8	0,03540039	4,99992371	-0,12588501	-0,17700195	33,81	-0,01	-0,00173639	-2,89398E-08
9	0,03601074	4,99359131	-0,10147094	-0,18005371	33,81	-0,01	-0,00176633	-2,94388E-08
10	0,03234863	4,9911499	-0,01907348	-0,16174316	33,81	0,00	-0,0015867	-2,6445E-08
11	0,01220703	4,98291016	-0,07400512	-0,06103516	33,81	0,00	-0,00059875	-9,97925E-09
12	0,01525879	4,98840332	-0,09002685	-0,07629395	33,81	0,00	-0,00074844	-1,24741E-08
13	0,03112793	4,99000549	-0,06179809	-0,15563965	33,81	0,00	-0,00152682	-2,54471E-08
14	0,04180908	4,98718262	-0,18920898	-0,20904541	33,81	-0,01	-0,00205074	-3,41789E-08
15	0,04150391	4,99992371	-0,18920898	-0,20751953	33,81	-0,01	-0,00203577	-3,39294E-08
16	0,0390625	4,99992371	-0,14190673	-0,1953125	33,81	-0,01	-0,00191602	-3,19336E-08
17	0,04302979	4,99519348	-0,17623901	-0,21514893	33,81	-0,01	-0,00211061	-3,51768E-08
18	0,03479004	4,99862671	-0,18920898	-0,1739502	33,81	-0,01	-0,00170645	-2,84409E-08
19	0,02227783	4,99992371	-0,12588501	-0,11138916	33,81	0,00	-0,00109273	-1,82121E-08
20	0,01251221	4,99359131	-0,18920898	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
21	0,0189209	4,99992371	-0,18920898	-0,09460449	33,81	0,00	-0,00092807	-1,54678E-08
22	0,03204346	4,99992371	-0,18920898	-0,16021729	33,81	0,00	-0,00157173	-2,61955E-08
23	0,03692627	4,99992371	-0,18920898	-0,18463135	33,81	-0,01	-0,00181123	-3,01872E-08
24	0,01281738	4,99992371	-0,15411377	-0,06408691	33,81	0,00	-0,00062869	-1,04782E-08
25	0,03204346	4,99641419	0,01602173	-0,16021729	33,81	0,00	-0,00157173	-2,61955E-08
26	0,04211426	4,97940064	-0,02059936	-0,21057129	33,81	-0,01	-0,0020657	-3,44284E-08
27	0,02258301	4,98306274	-0,04730224	-0,11291504	33,81	0,00	-0,0011077	-1,84616E-08
28	0,01251221	4,98573303	-0,06179809	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
29	0,01831055	4,98718262	-0,18920898	-0,09155273	33,81	0,00	-0,00089813	-1,49689E-08
30	0,02838135	4,99992371	-0,15487671	-0,14190674	33,81	0,00	-0,00139211	-2,32018E-08
31	0,03662109	4,99649048	-0,1411438	-0,18310547	33,81	-0,01	-0,00179626	-2,99377E-08
32	0,03265381	4,99511719	-0,18920898	-0,16326904	33,81	0,00	-0,00160167	-2,66945E-08

Materiale: M2 Stedlig masse Tverråne

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sink/bitumen

Serie nr: 2 Forsøk nr 1



0

Stedlig morenejord henta fra bakken ovenfor Tverråne kraftverg Nesbyen. 9600 g prøve + plate + lodd + kasse

Svært tørr jord ned mot røret som støver når man slipper den. 3,5 cm lengde på trekk

0

0

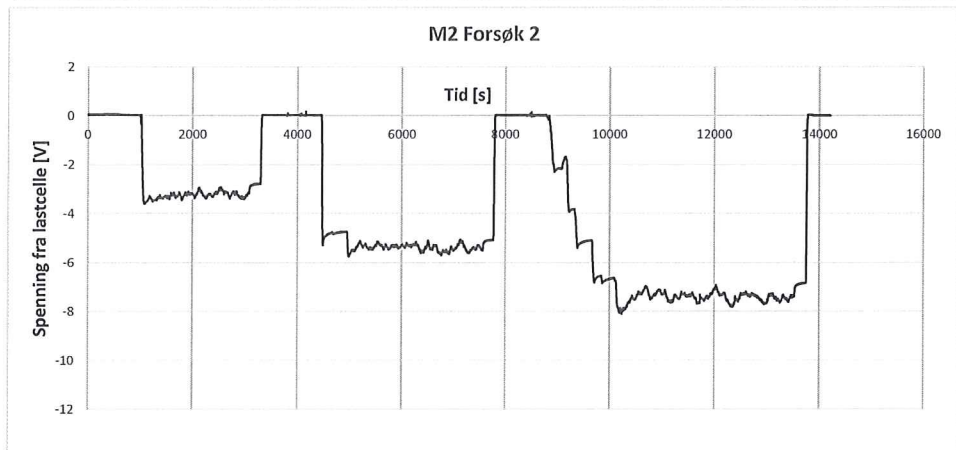
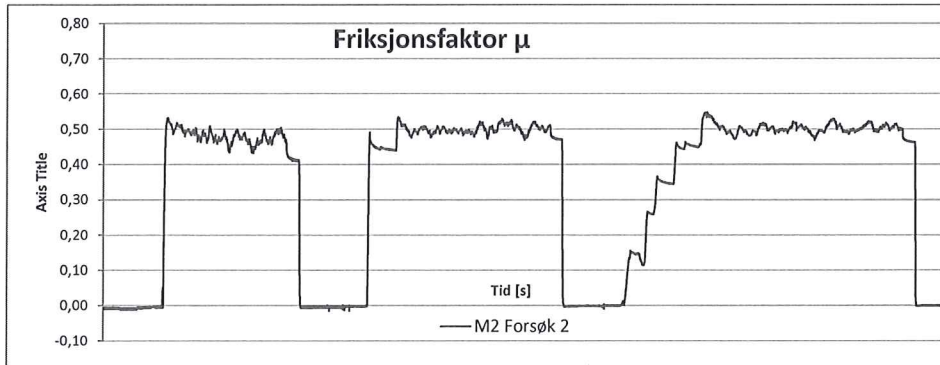
0

0

Materiale: M2 Stedlig masse Tverråne

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sink/bitumen

Serie nr: 2 Forsøk nr 2

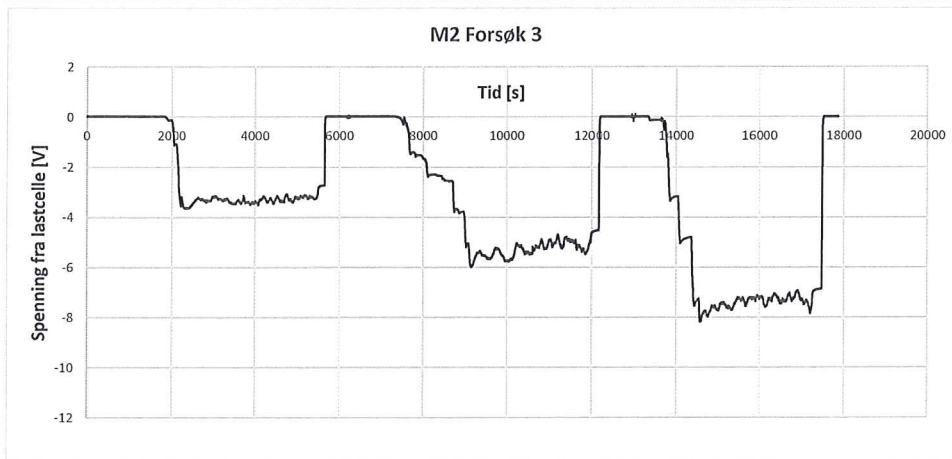
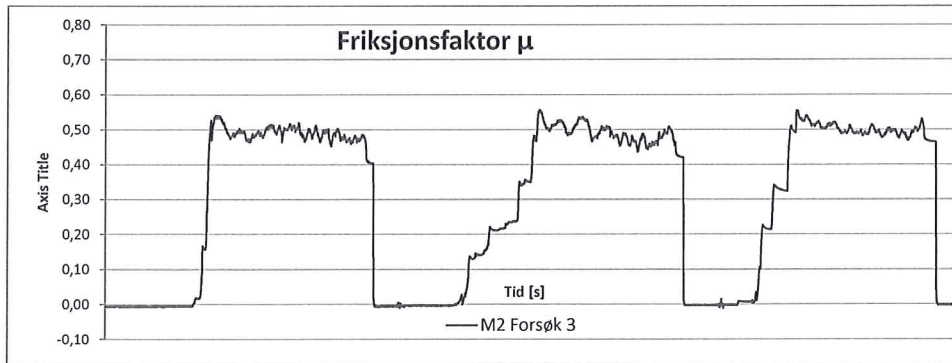


0
Stedlig morenejord henta fra bakken ovenfor Tverråne kraftverg Nesbyen. 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Svært tørr jord ned mot røret som støver når man slipper den. 3,5 cm lengde på trekk
Starta med lav spenning på kontrollboksne slik at spenninga får bygd seg opp og at den ikke røstes av gårde med en gang
0
0
0

Materiale: M2 Stedlig masse Tverråne

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sink/bitumen

Serie nr: 2 Forsøk nr 3



0

Stedlig morenejord henta fra bakken ovenfor Tverråne kraftverg Nesbyen. 9600 g prøve + plate + lodd + kasse

Tørr jord, men har blitt blanda med noe som var litt mørkere i fargen som ikke støver. 3,5 cm lengde på trekk

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1 cm høyde

Ser at det er mer klassisk form på kurva når jeg kjører fra 0 V og lar krafta bygge seg opp.

0

0

Materiale:

M4 naturmasser Ekle

Serie nr

3

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sink/bitumen

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =		0,2 V endring i spenning
A	Areal prøve	60000 mm ²	
g	Gravitasjon	0,00981 m/s ²	
ζ	faktor lengde	-10 cm/V	
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81 kg	
	Lodd	20,00 kg	

Informasjon om forsøket:

Skrapmasser henta fra Ekle sandtak. 00 g prøve + plate + lodd + kasse

Tørr jord, men har blitt blanda med noe som var litt mørkere i fargen som ikke støver. 3,5 cm lengde på trekk

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1 cm høyde

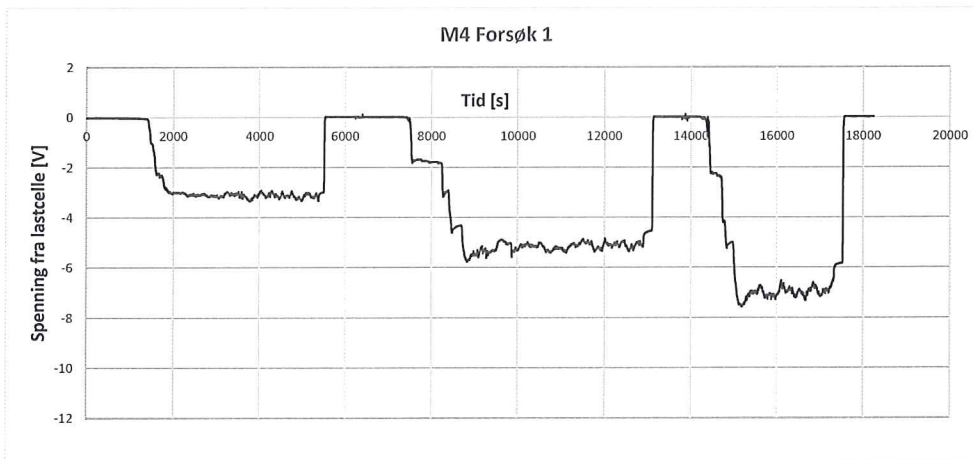
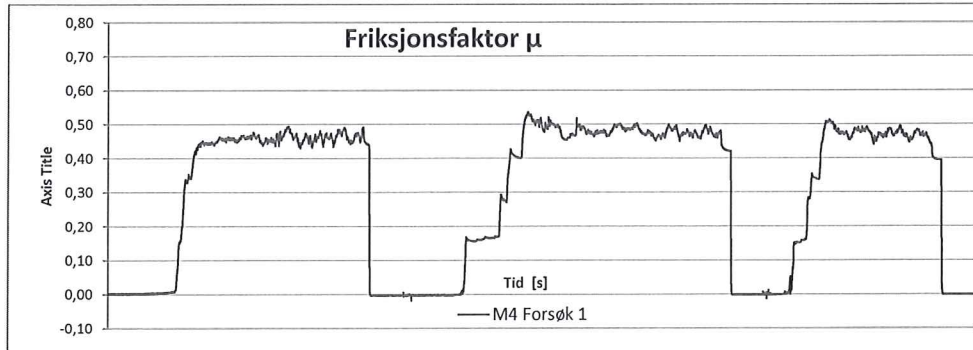
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator

M4 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Førflytning	Trekkkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkkraft	Skjærspenning
Benevning	V_L [V]	V_A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			$\Delta V_A \times \zeta$	$V_L \times \lambda$		P / N	P x g	F / A
0	-0,01678467	4,98100281	-0,15563964	0,08392334	33,81	0,00	0,00082329	1,37215E-08
1	-0,01953125	4,99656677	0,00228882	0,09765625	33,81	0,00	0,00095801	1,59668E-08
2	-0,01861572	4,98077393	-0,10299682	0,09307862	33,81	0,00	0,0009131	1,52184E-08
3	-0,02044678	4,99130249	-0,17700195	0,10223389	33,81	0,00	0,00100291	1,67152E-08
4	-0,0177002	4,998703	-0,11138916	0,08850098	33,81	0,00	0,00086819	1,44699E-08
5	-0,01831055	4,99214172	-0,18844604	0,09155274	33,81	0,00	0,00089813	1,49689E-08
6	-0,01525879	4,99984741	-0,18920898	0,07629395	33,81	0,00	0,00074844	1,24741E-08
7	-0,02075195	4,99992371	-0,18920898	0,10375977	33,81	0,00	0,00101788	1,69647E-08
8	-0,01708984	4,99992371	-0,12588501	0,08544922	33,81	0,00	0,00083826	1,39709E-08
9	-0,0177002	4,99359131	-0,10147094	0,08850098	33,81	0,00	0,00086819	1,44699E-08
10	-0,01403809	4,9911499	-0,01907348	0,07019043	33,81	0,00	0,00068857	1,14761E-08
11	-0,0189209	4,98291016	-0,07400512	0,09460449	33,81	0,00	0,00092807	1,54678E-08
12	-0,01098633	4,98840332	-0,09002685	0,05493164	33,81	0,00	0,00053888	8,98132E-09
13	-0,01678467	4,99000549	-0,06179809	0,08392334	33,81	0,00	0,00082329	1,37215E-08
14	-0,01861572	4,98718262	-0,18920898	0,09307862	33,81	0,00	0,0009131	1,52184E-08
15	-0,01922607	4,99992371	-0,18920898	0,09613037	33,81	0,00	0,00094304	1,57173E-08
16	-0,01708984	4,99992371	-0,14190673	0,08544922	33,81	0,00	0,00083826	1,39709E-08
17	-0,01342773	4,99519348	-0,17623901	0,06713867	33,81	0,00	0,00065863	1,09772E-08
18	-0,00946045	4,99862671	-0,18920898	0,04730225	33,81	0,00	0,00046404	7,73392E-09
19	-0,00427246	4,99992371	-0,12588501	0,02136231	33,81	0,00	0,00020956	3,49274E-09
20	-0,00488281	4,99359131	-0,18920898	0,02441407	33,81	0,00	0,0002395	3,9917E-09
21	-0,01403809	4,99992371	-0,18920898	0,07019043	33,81	0,00	0,00068857	1,14761E-08
22	-0,01708984	4,99992371	-0,18920898	0,08544922	33,81	0,00	0,00083826	1,39709E-08
23	-0,02105713	4,99992371	-0,18920898	0,10528565	33,81	0,00	0,00103285	1,72142E-08
24	-0,01647949	4,99992371	-0,15411377	0,08239746	33,81	0,00	0,00080832	1,3472E-08
25	-0,01983643	4,99641419	0,01602173	0,09918213	33,81	0,00	0,00097298	1,62163E-08
26	-0,00549316	4,97940064	-0,02059936	0,02746582	33,81	0,00	0,00026944	4,49066E-09
27	-0,00488281	4,98306274	-0,04730224	0,02441407	33,81	0,00	0,0002395	3,9917E-09
28	-0,01617432	4,98573303	-0,06179809	0,08087158	33,81	0,00	0,00079335	1,32225E-08
29	-0,0201416	4,98718262	-0,18920898	0,10070801	33,81	0,00	0,00098795	1,64658E-08
30	-0,0189209	4,99992371	-0,15487671	0,09460449	33,81	0,00	0,00092807	1,54678E-08
31	-0,0100708	4,99649048	-0,1411438	0,05035401	33,81	0,00	0,00049397	8,23288E-09
32	-0,01342773	4,99511719	-0,18920898	0,06713867	33,81	0,00	0,00065863	1,09772E-08
33	-0,00579834	4,99992371	-0,12512207	0,0289917	33,81	0,00	0,00028441	4,74014E-09
34	-0,0112915	4,99351502	-0,18920898	0,05645752	33,81	0,00	0,00055385	9,2308E-09
35	-0,00854492	4,99992371	-0,17929077	0,04272461	33,81	0,00	0,00041913	6,98547E-09
36	-0,01556397	4,99893189	-0,09307861	0,07781983	33,81	0,00	0,00076341	1,27235E-08
37	-0,00427246	4,99031067	-0,18920898	0,02136231	33,81	0,00	0,00020956	3,49274E-09

Materiale: M4 naturmasser Ekle
Serie nr: 3 Forsøk nr 1

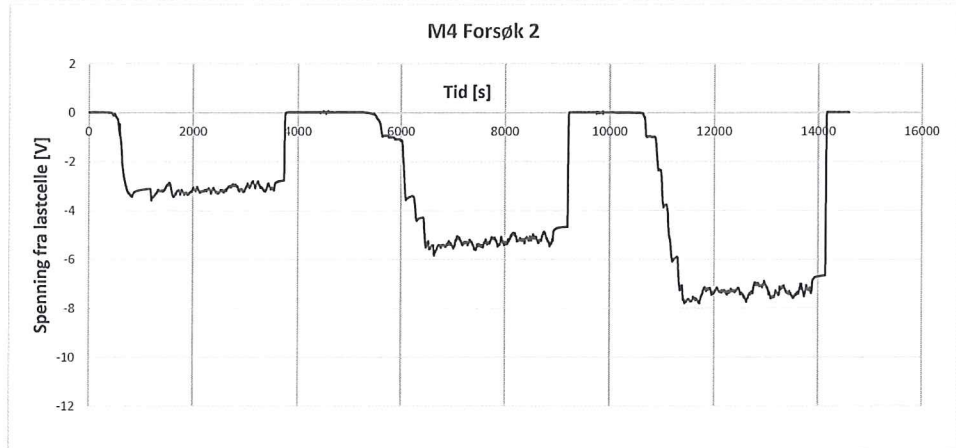
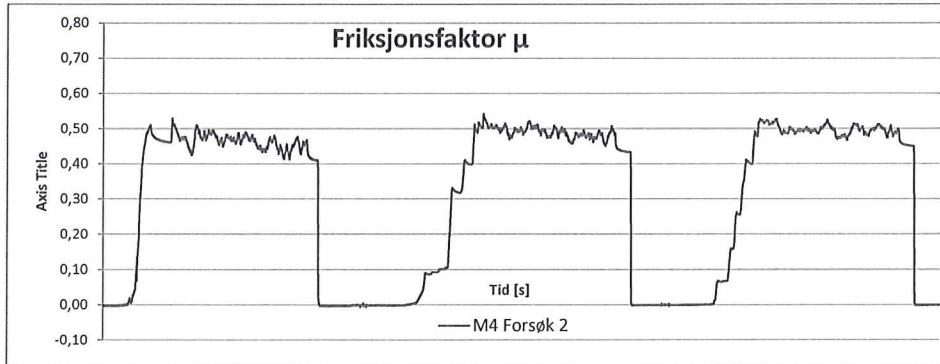
Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sir



0
Skråmasser henta fra Ekle sandtak. 00 g prøve + plate + lodd + kasse
Tørr jord, men har blitt blanda med noe som var litt mørkere i fargen som ikke støver. 3,5 cm lengde på trekk
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1 cm høyde
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator
0
0

Materiale: M4 naturmasser Ekle
Serie nr: 3 Forsøk nr 2

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkapp



0

Skråmasser henta fra Ekle sandtak. 9600 g prøve + plate + lodd + kasse

Tørr jord, men har blitt blanda med noe som var litt mørkere i fargen som ikke støver. 3,5 cm lengde på trekk

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1 cm høyde

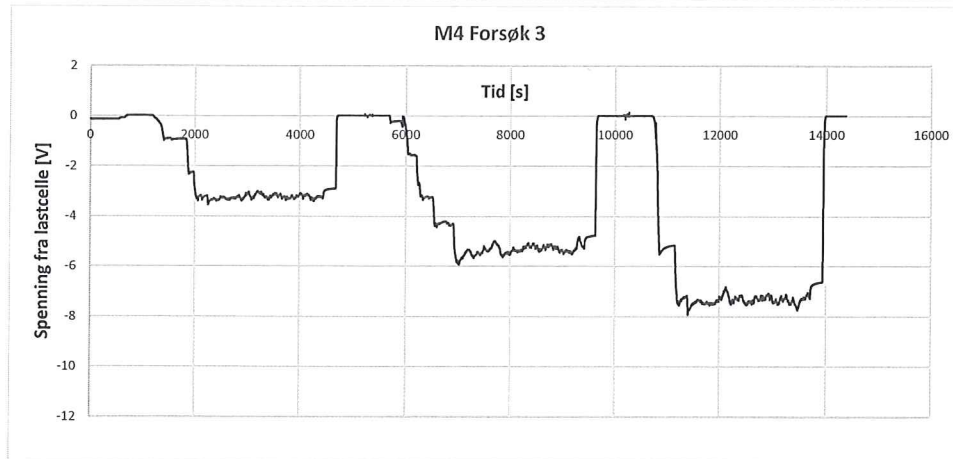
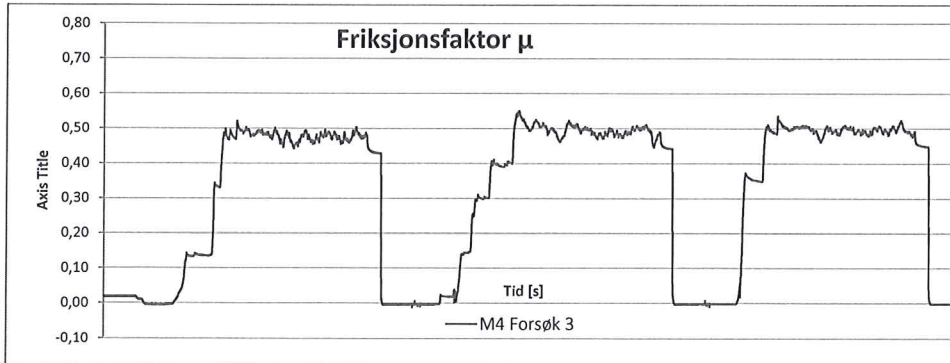
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator

Prøva støver ikke,

0

Materiale: M4 naturmasser Ekle
Serie nr: 3 Forsøk nr 3

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe



0

Skrapmasser henta fra Ekle sandtak. 9600 g prøve + plate + lodd + kasse

Tørr jord, men har blitt blanda med noe som var litt mørkere i fargen som ikke støver. 3,5 cm lengde på trekk

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

Kjører fra 1 V og oppover på aktuator

Prøva støver ikke, tatt bilde av hvordan den ser ut etter sammenpressing i hånda

0

Materiale:

M5 svart, sandig, grusig jord

Serie nr

4

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sink/bitumen

Innndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =	0,2	V endring i spenning
A	Areal prøve	60000	mm ²
g	Gravitasjon	0,00981	m/s ²
ζ	faktor lengde	-10	cm/V
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81	kg
	Lodd	20,00	kg

Informasjon om forsøket:

Sortert jord fra Kroon Maksin på Fagernes, 9600 g prøve + plate + lodd + kasse

Tørr jord, men har blitt blanda med noe som var litt mørkere i fargen som ikke støver. 3,5 cm lengde på trekk

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrett. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

Kjører fra 1 V og oppover på aktuator

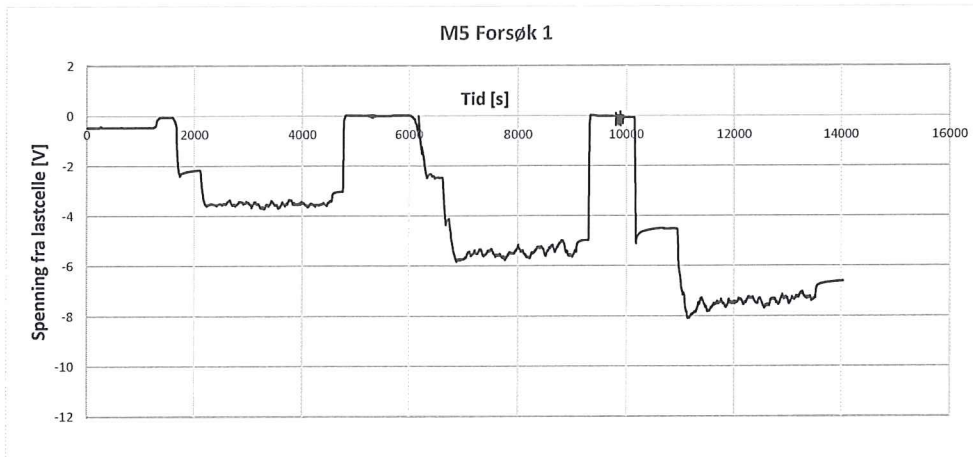
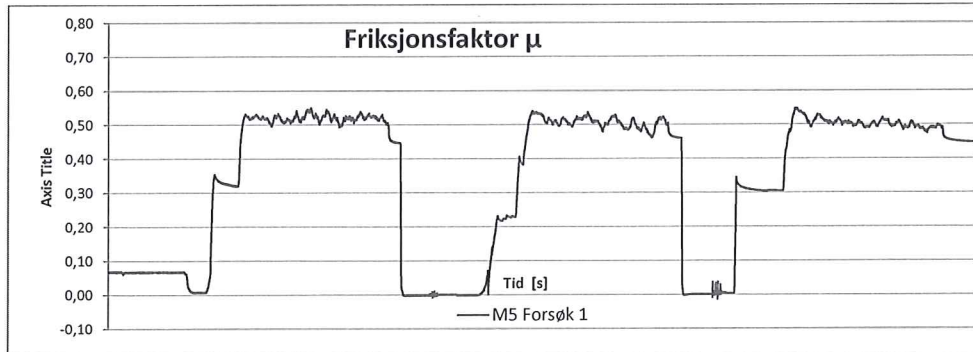
Prøva støver ikke, tatt bilde av hvordan den ser ut etter sammenpressing i hånda, henger ikke sammen etter sammenpressing i serlig grad. Tatt bilde

M5 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkkraft	Skjærspenning
Benevning	V _L [V]	V _A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			ΔV _A × ζ	V _L × λ		P / N	P × g	F / A
0	-0,46813965	4,98100281	-0,15563964	2,34069824	33,81	0,07	0,02296225	3,82704E-07
1	-0,4675293	4,99656677	0,00228882	2,33764648	33,81	0,07	0,02293231	3,82205E-07
2	-0,4598999	4,98077393	-0,10299682	2,29949951	33,81	0,07	0,02255809	3,75968E-07
3	-0,45837402	4,99130249	-0,17700195	2,29187012	33,81	0,07	0,02248325	3,74721E-07
4	-0,46569824	4,998703	-0,11138916	2,32849121	33,81	0,07	0,0228425	3,80708E-07
5	-0,46264648	4,99214172	-0,18844604	2,31323242	33,81	0,07	0,02269281	3,78214E-07
6	-0,46112061	4,99984741	-0,18920898	2,30560303	33,81	0,07	0,02261797	3,76966E-07
7	-0,46539307	4,99992371	-0,18920898	2,32696533	33,81	0,07	0,02282753	3,80459E-07
8	-0,46813965	4,99992371	-0,12588501	2,34069824	33,81	0,07	0,02296225	3,82704E-07
9	-0,45440674	4,99359131	-0,10147094	2,27203369	33,81	0,07	0,02228865	3,71478E-07
10	-0,45318604	4,9911499	-0,01907348	2,26593018	33,81	0,07	0,02222878	3,7048E-07
11	-0,46783447	4,98291016	-0,07400512	2,33917236	33,81	0,07	0,02294728	3,82455E-07
12	-0,46569824	4,98840332	-0,09002685	2,32849121	33,81	0,07	0,0228425	3,80708E-07
13	-0,45288086	4,99000549	-0,06179809	2,2644043	33,81	0,07	0,02221381	3,7023E-07
14	-0,46936035	4,98718262	-0,18920898	2,34680176	33,81	0,07	0,02302213	3,83702E-07
15	-0,45715332	4,99992371	-0,18920898	2,2857666	33,81	0,07	0,02242337	3,73723E-07
16	-0,46112061	4,99992371	-0,14190673	2,30560303	33,81	0,07	0,02261797	3,76966E-07
17	-0,47058105	4,99519348	-0,17623901	2,35290527	33,81	0,07	0,023082	3,847E-07
18	-0,45593262	4,99862671	-0,18920898	2,27966309	33,81	0,07	0,02236349	3,72725E-07
19	-0,45349121	4,99992371	-0,12588501	2,26745605	33,81	0,07	0,02224374	3,70729E-07
20	-0,46875	4,99359131	-0,18920898	2,34375	33,81	0,07	0,02299219	3,83203E-07
21	-0,46142578	4,99992371	-0,18920898	2,30712891	33,81	0,07	0,02263293	3,77216E-07
22	-0,45318604	4,99992371	-0,18920898	2,26593018	33,81	0,07	0,02222878	3,7048E-07
23	-0,4586792	4,99992371	-0,18920898	2,293396	33,81	0,07	0,02249821	3,7497E-07
24	-0,46783447	4,99992371	-0,15411377	2,33917236	33,81	0,07	0,02294728	3,82455E-07
25	-0,46234131	4,99641419	0,01602173	2,31170654	33,81	0,07	0,02267784	3,77964E-07
26	-0,45959473	4,97940064	-0,02059936	2,29797363	33,81	0,07	0,02254312	3,75719E-07
27	-0,4675293	4,98306274	-0,04730224	2,33764648	33,81	0,07	0,02293231	3,82205E-07
28	-0,45623779	4,98573303	-0,06179809	2,28118896	33,81	0,07	0,02237846	3,72974E-07
29	-0,45898438	4,98718262	-0,18920898	2,29492188	33,81	0,07	0,02251318	3,7522E-07
30	-0,46539307	4,99992371	-0,15487671	2,32696533	33,81	0,07	0,02282753	3,80459E-07
31	-0,46630859	4,99649048	-0,1411438	2,33154297	33,81	0,07	0,02287244	3,81207E-07
32	-0,45318604	4,99511719	-0,18920898	2,26593018	33,81	0,07	0,02222878	3,7048E-07
33	-0,45898438	4,99992371	-0,12512207	2,29492188	33,81	0,07	0,02251318	3,7522E-07
34	-0,46478271	4,99351502	-0,18920898	2,32391357	33,81	0,07	0,02279759	3,7996E-07
35	-0,46356201	4,99992371	-0,17929077	2,31781006	33,81	0,07	0,02273772	3,78962E-07
36	-0,4675293	4,99893189	-0,09307861	2,33764648	33,81	0,07	0,02293231	3,82205E-07
37	-0,45288086	4,99031067	-0,18920898	2,2644043	33,81	0,07	0,02221381	3,7023E-07

Materiale: M5 svart, sandig, grusig jord
Serie nr: 4 Forsøk nr 1

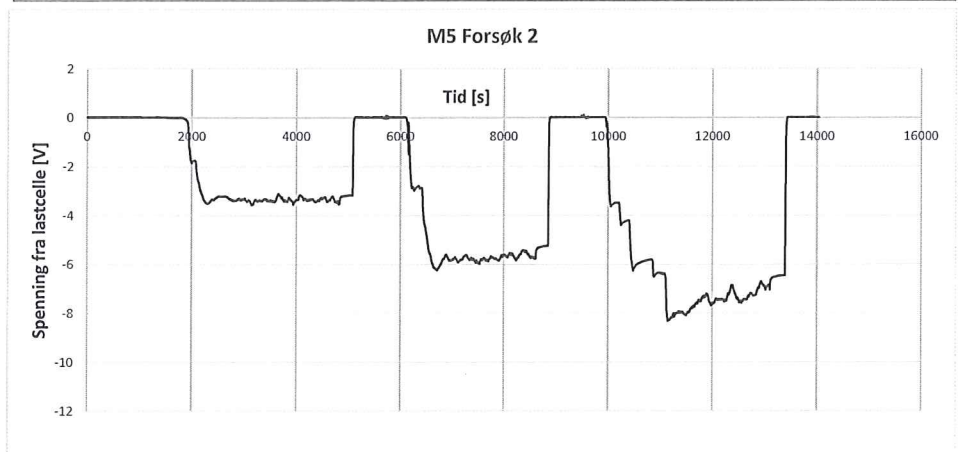
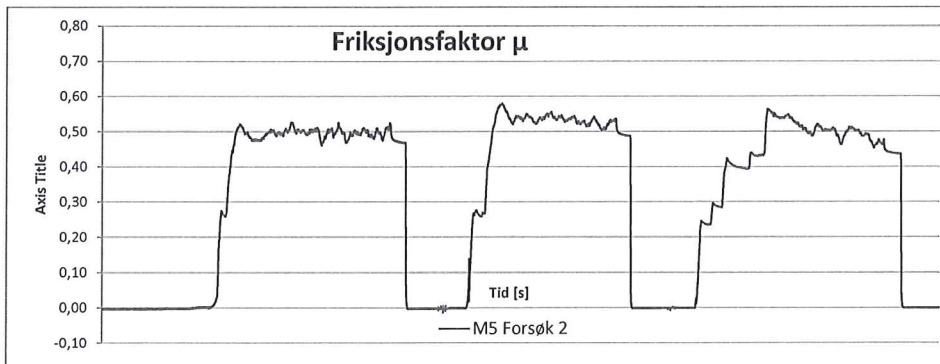
Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sir



0
Sortert jord fra Kroon Maksin på Fagernes, 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Tørr jord, men har blitt blanda med noe som var litt mørkere i fargen som ikke støver. 3,5 cm lengde på trekk
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator
Prøva støver ikke, tatt bilde av hvordan den ser ut etter sammenpressing i hånda, henger ikke sammen etter sammenpressing i serlig grad. Tatt bil
0

Materiale: M5 svart, sandig, grusig jord
Serie nr: 4 Forsøk nr 2

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkapp



0

Sortert jord fra Kroon Maksin på Fagernes, 9600 g prøve + plate + lodd + kasse

Tørr jord, men har blitt blanda med noe som var litt mørkere i fargen som ikke støver. 3,5 cm lengde på trekk

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

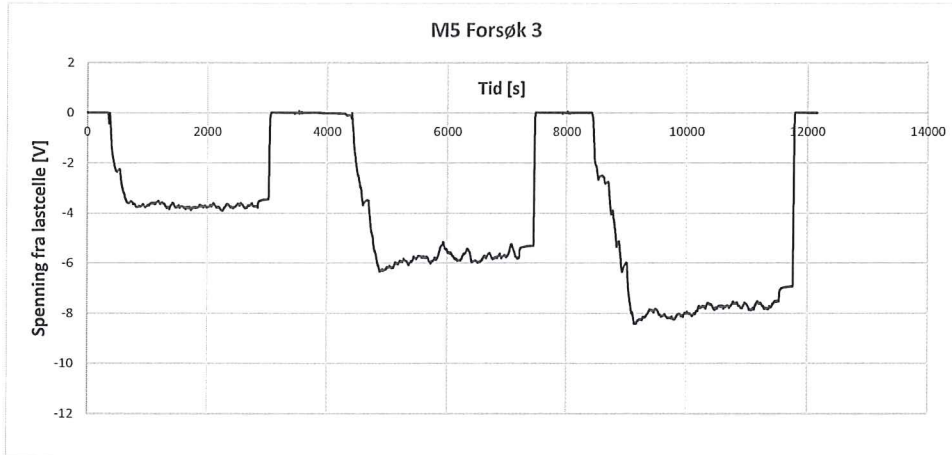
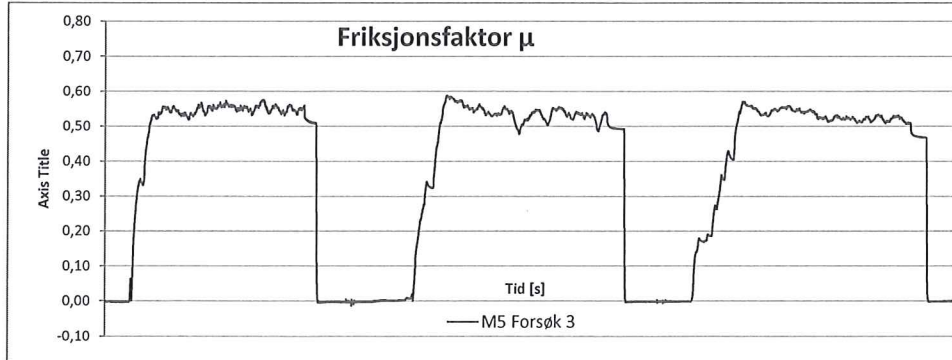
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator

Prøva støver ikke, tatt bilde av hvordan den ser ut etter sammenpressing i hånda,

henger ikke sammen etter sammenpressing i serlig grad. Tatt bilde

Materiale: M5 svart, sandig, grusig jord
Serie nr: 4 Forsøk nr 3

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe



0
Sortert jord fra Kroon Maksin på Fagernes, 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Tørr jord, men har blitt blanda med noe som var litt mørkere i fargen som ikke støver. 3,5 cm lengde på trekk
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator
Prøva støver ikke
0

Materiale:

M7 16-22 mm knust naturpukk Tverråne

Serie nr

5

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sink/bitumen

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =		0,2 V endring i spenning
A	Areal prøve	60000 mm ²	
g	Gravitasjon	0,00981 m/s ²	
ζ	faktor lengde	-10 cm/V	
N	Vekt av prøve 4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd		
	Sum	13,81 kg	
	Lodd	20,00 kg	

Informasjon om forsøket:

Sortert pukk fra morenemasser, moderat til lite knust, 9600 g prøve + plate + lodd + kasse

Tørr. 3,5 cm lengde på trekk

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrett. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

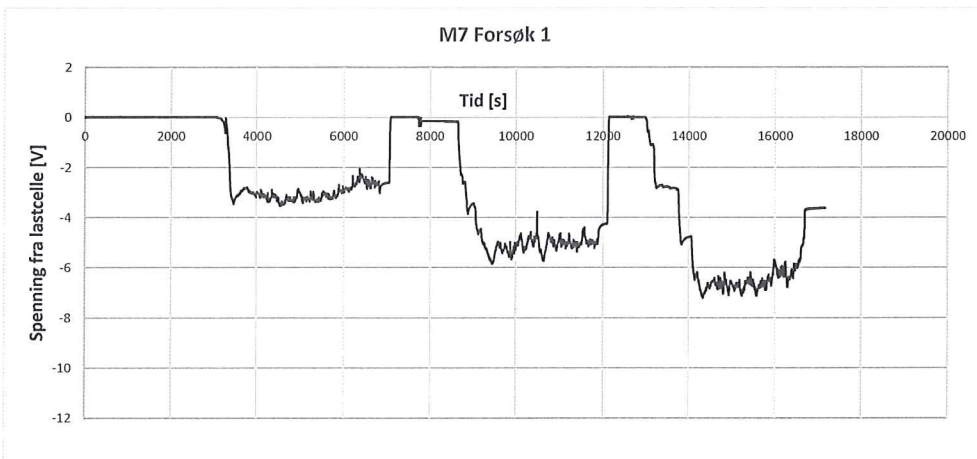
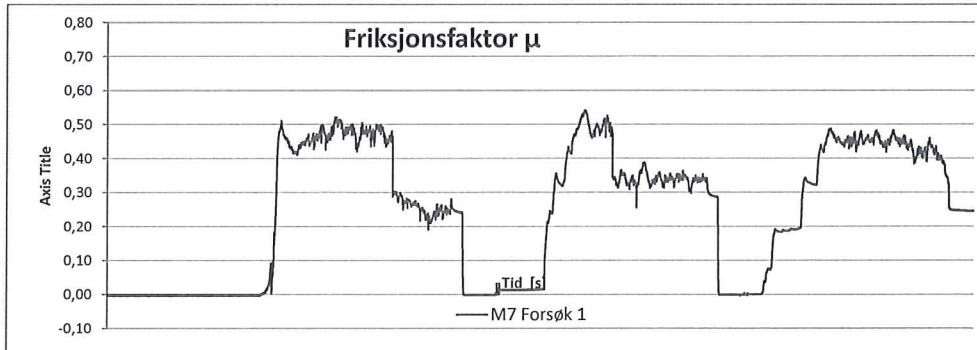
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator

M7 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkkraft	Skjærspenning
Benevning	V _i [V]	V _A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			ΔV _A × ζ	V _i × λ		P / N	P × g	F / A
0	0,01647949	4,98100281	-0,15563964	-0,08239746	33,81	0,00	-0,00080832	-1,3472E-08
1	0,00335693	4,99656677	0,00228882	-0,01678467	33,81	0,00	-0,00016466	-2,74429E-09
2	0,02746582	4,98077393	-0,10299682	-0,1373291	33,81	0,00	-0,0013472	-2,24533E-08
3	0,02288818	4,99130249	-0,17700195	-0,11444092	33,81	0,00	-0,00112267	-1,87111E-08
4	0,00305176	4,998703	-0,11138916	-0,01525879	33,81	0,00	-0,00014969	-2,49481E-09
5	0,02349854	4,99214172	-0,18844604	-0,11749268	33,81	0,00	-0,0011526	-1,92101E-08
6	0,02532959	4,99984741	-0,18920898	-0,12664795	33,81	0,00	-0,00124242	-2,07069E-08
7	0,01953125	4,99992371	-0,18920898	-0,09765625	33,81	0,00	-0,00095801	-1,59668E-08
8	0,00427246	4,99992371	-0,12588501	-0,0213623	33,81	0,00	-0,00020956	-3,49274E-09
9	0,0100708	4,99359131	-0,10147094	-0,050354	33,81	0,00	-0,00049397	-8,23288E-09
10	0,02990723	4,9911499	-0,01907348	-0,14953613	33,81	0,00	-0,00146695	-2,44492E-08
11	0,00152588	4,98291016	-0,07400512	-0,00762939	33,81	0,00	-7,4844E-05	-1,24741E-09
12	0,0213623	4,98840332	-0,09002685	-0,10681152	33,81	0,00	-0,00104782	-1,74637E-08
13	0,01983643	4,99000549	-0,06179809	-0,09918213	33,81	0,00	-0,00097298	-1,62163E-08
14	0,00366211	4,98718262	-0,18920898	-0,01831055	33,81	0,00	-0,00017963	-2,99377E-09
15	0,02593994	4,99992371	-0,18920898	-0,12969971	33,81	0,00	-0,00127235	-2,12059E-08
16	0,00396729	4,99992371	-0,14190673	-0,01983643	33,81	0,00	-0,0001946	-3,24326E-09
17	0,02258301	4,99519348	-0,17623901	-0,11291504	33,81	0,00	-0,0011077	-1,84616E-08
18	0,02563477	4,99862671	-0,18920898	-0,12817383	33,81	0,00	-0,00125739	-2,09564E-08
19	0,00427246	4,99992371	-0,12588501	-0,0213623	33,81	0,00	-0,00020956	-3,49274E-09
20	0,02105713	4,99359131	-0,18920898	-0,10528564	33,81	0,00	-0,00103285	-1,72142E-08
21	0,02441406	4,99992371	-0,18920898	-0,12207031	33,81	0,00	-0,00119751	-1,99585E-08
22	0,00427246	4,99992371	-0,18920898	-0,0213623	33,81	0,00	-0,00020956	-3,49274E-09
23	0,01739502	4,99992371	-0,18920898	-0,0869751	33,81	0,00	-0,00085323	-1,42204E-08
24	0,02532959	4,99992371	-0,15411377	-0,12664795	33,81	0,00	-0,00124242	-2,07069E-08
25	0,0112915	4,99641419	0,01602173	-0,05645752	33,81	0,00	-0,00055385	-9,2308E-09
26	0,01373291	4,97940064	-0,02059936	-0,06866455	33,81	0,00	-0,0006736	-1,12267E-08
27	0,02624512	4,98306274	-0,04730224	-0,13122559	33,81	0,00	-0,00128732	-2,14554E-08
28	0,00366211	4,98573303	-0,06179809	-0,01831055	33,81	0,00	-0,00017963	-2,99377E-09
29	0,02593994	4,98718262	-0,18920898	-0,12969971	33,81	0,00	-0,00127235	-2,12059E-08
30	0,02380371	4,99992371	-0,15487671	-0,11901855	33,81	0,00	-0,00116757	-1,94595E-08
31	0,00396729	4,99649048	-0,1411438	-0,01983643	33,81	0,00	-0,0001946	-3,24326E-09
32	0,02532959	4,99511719	-0,18920898	-0,12664795	33,81	0,00	-0,00124242	-2,07069E-08
33	0,02197266	4,99992371	-0,12512207	-0,10986328	33,81	0,00	-0,00107776	-1,79626E-08
34	0,00488281	4,99351502	-0,18920898	-0,02441406	33,81	0,00	-0,0002395	-3,9917E-09
35	0,02716064	4,99992371	-0,17929077	-0,13580322	33,81	0,00	-0,00133223	-2,22038E-08
36	0,02532959	4,99893189	-0,09307861	-0,12664795	33,81	0,00	-0,00124242	-2,07069E-08
37	0,01556396	4,99031067	-0,18920898	-0,07781982	33,81	0,00	-0,00076341	-1,27235E-08

Materiale: M7 16-22 mm knust naturpukk Tverrån
Serie nr: 5 Forsøk nr 1

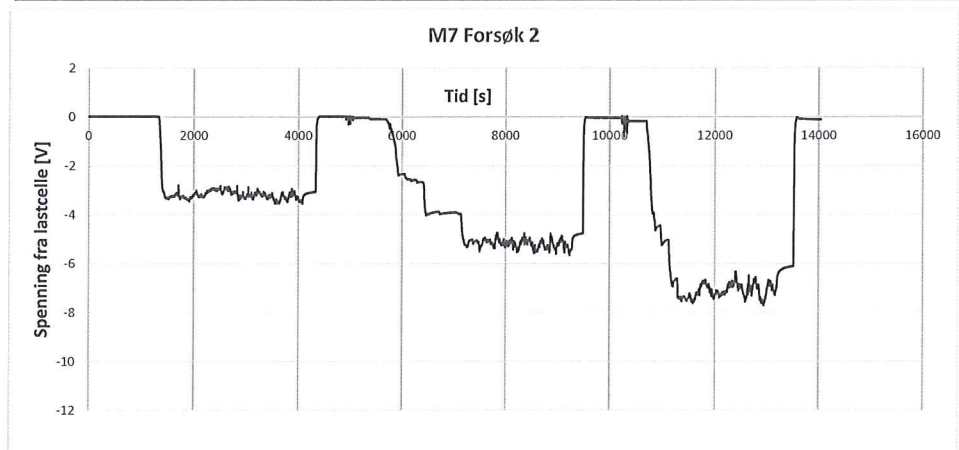
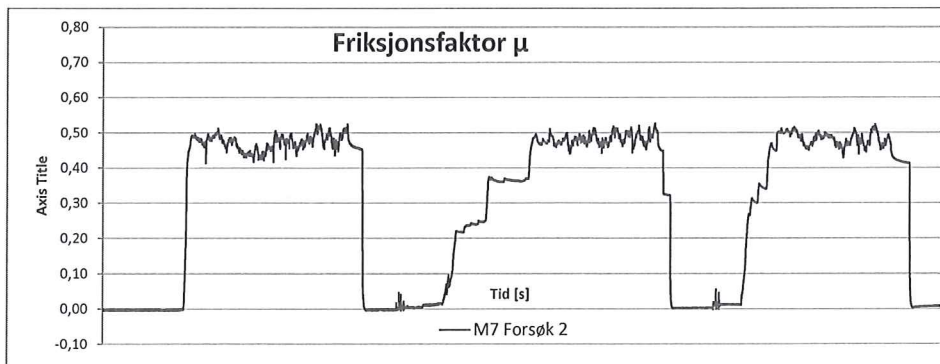
Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe av sir



0
Sortert pukk fra morenemasser, moderat til lite knust, 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Tørr. 3,5 cm lengde på trekk
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator
0
0

Materiale: M7 16-22 mm knust naturpukk Tverrån
Serie nr: 5 Forsøk nr 2

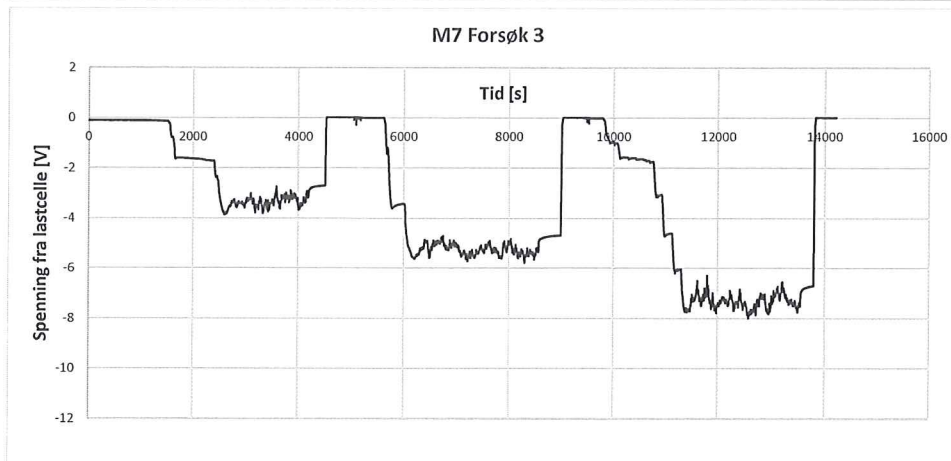
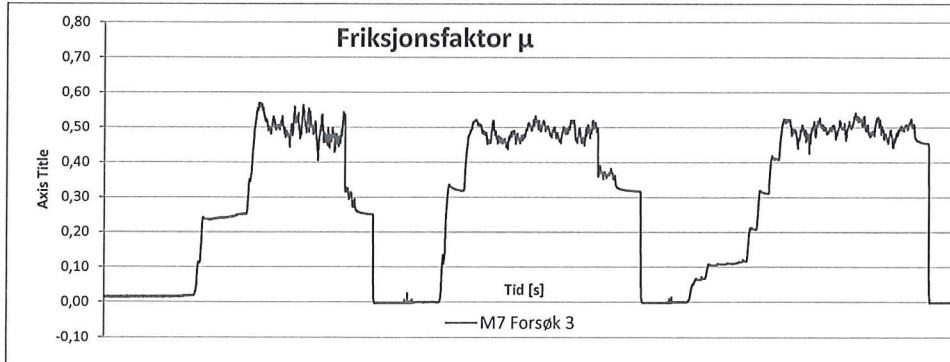
Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkapp



0
Sortert pukk fra morenemasser, moderat til lite knust, 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Tørr. 3,5 cm lengde på trekk
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyd
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator
0
0

Materiale: M7 16-22 mm knust naturpukk Tverran
Serie nr: 5 Forsøk nr 3

Rør: Ø500 mm, duktilt st. j. ytterkappe a



0
Sortert pukk fra morenemasser, moderat til lite knust, 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Tørr. 3,5 cm lengde på trekk
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fra 1 V og oppover på aktuator
0
0

Materiale:

M6: 8-16 mm knust pukk fra Sundli Kraftverk

Serie nr

11

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite Forsøk

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =	0,2	V endring i spenning
A	Areal prøve	60000	mm ²
g	Gravitasjon	0,00981	m/s ²
ζ	faktor lengde	-10	cm/V
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81	kg
	Lodd	20,00	kg

Informasjon om forsøket:

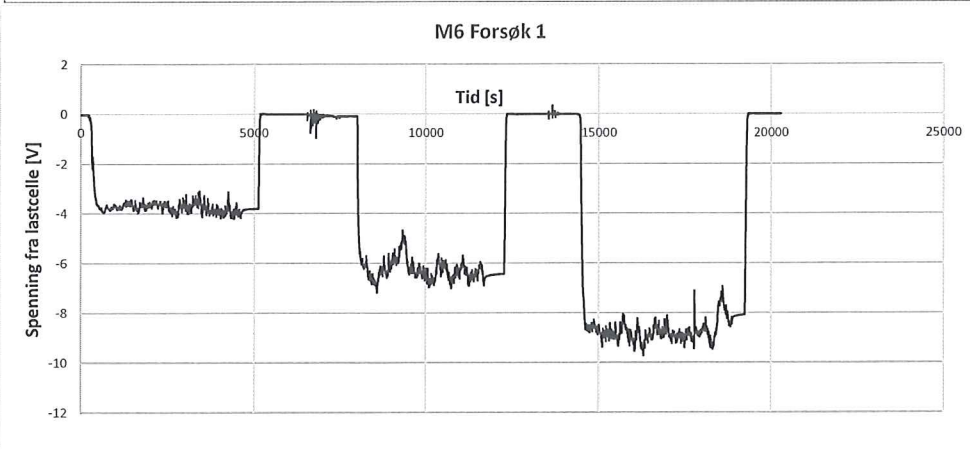
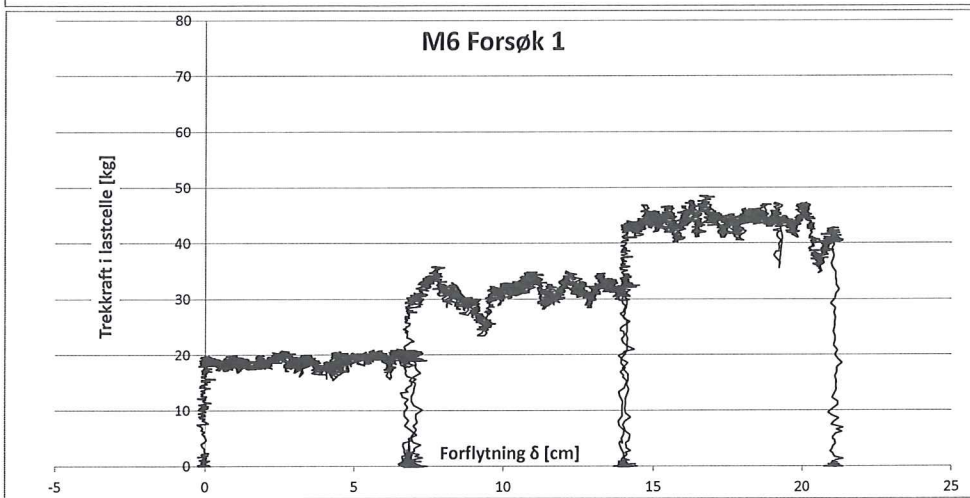
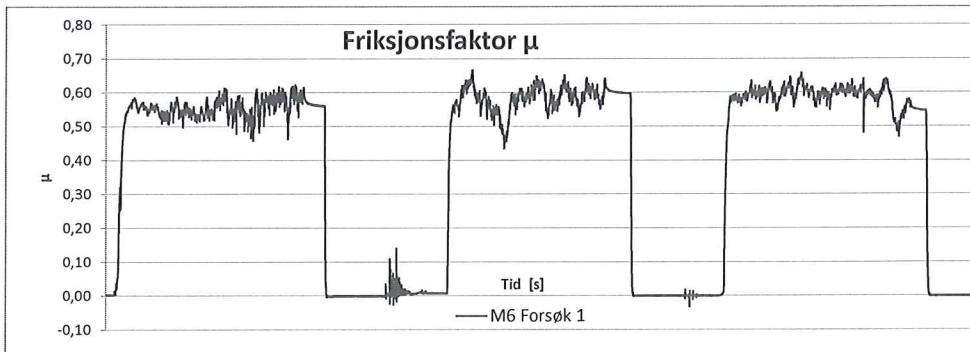
Forsøksserie 1 Pukk Sundli kraftverk, tørt rør, tørre masser, Inne i laboratorium ca 22 varmegrader

Lengde 5 cm for hver pålasting, 9600 g masse + kasse + plate

M6 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkraft	Skjærspenning
Benevning	V_L [V]	V_A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			$\Delta V_A \times \zeta$	$V_L \times \lambda$		P / N	P x g	F / A
0	-0,02716064	4,86000061	-0,06332397	0,13580322	33,81	0,00	0,00133223	2,22038E-08
1	-0,02685547	4,86633301	-0,0328064	0,13427734	33,81	0,00	0,00131726	2,19543E-08
2	-0,02655029	4,86328125	-0,01220703	0,13275146	33,81	0,00	0,00130229	2,17049E-08
3	-0,02044678	4,86122131	-0,09765625	0,10223389	33,81	0,00	0,00100291	1,67152E-08
4	-0,02044678	4,86976624	-0,10910034	0,10223389	33,81	0,00	0,00100291	1,67152E-08
5	-0,02380371	4,87091064	-0,09841919	0,11901855	33,81	0,00	0,00116757	1,94595E-08
6	-0,02349854	4,86984253	-0,06637573	0,11749268	33,81	0,00	0,0011526	1,92101E-08
7	-0,01525879	4,86663818	-0,06103516	0,07629395	33,81	0,00	0,00074844	1,24741E-08
8	-0,01312256	4,86610413	-0,03051758	0,06561279	33,81	0,00	0,00064366	1,07277E-08
9	-0,01251221	4,86305237	0,12435913	0,06256104	33,81	0,00	0,00061372	1,02287E-08
10	-0,01953125	4,8475647	-0,10223389	0,09765625	33,81	0,00	0,00095801	1,59668E-08
11	-0,0289917	4,870224	0,03967285	0,1449585	33,81	0,00	0,00142204	2,37007E-08
12	-0,02624512	4,85603333	0,04196167	0,13122559	33,81	0,00	0,00128732	2,14554E-08
13	-0,02380371	4,85580444	0,05264282	0,11901855	33,81	0,00	0,00116757	1,94595E-08
14	-0,01861572	4,85473633	-0,08163452	0,09307861	33,81	0,00	0,0009131	1,52184E-08
15	-0,02197266	4,86816406	-0,14038086	0,10986328	33,81	0,00	0,00107776	1,79626E-08
16	-0,02380371	4,8740387	-0,1663208	0,11901855	33,81	0,00	0,00116757	1,94595E-08
17	-0,01800537	4,87663269	0,11978149	0,09002686	33,81	0,00	0,00088316	1,47194E-08
18	-0,01464844	4,84802246	0,04501343	0,07324219	33,81	0,00	0,00071851	1,19751E-08
19	-0,01464844	4,85549927	-0,00305176	0,07324219	33,81	0,00	0,00071851	1,19751E-08
20	-0,02441406	4,86030579	-0,10910034	0,12207031	33,81	0,00	0,00119751	1,99585E-08
21	-0,02624512	4,87091064	-0,14572144	0,13122559	33,81	0,00	0,00128732	2,14554E-08
22	-0,02441406	4,87457275	-0,00076294	0,12207031	33,81	0,00	0,00119751	1,99585E-08
23	-0,02502441	4,8600769	0,04653931	0,12512207	33,81	0,00	0,00122745	2,04575E-08
24	-0,01708984	4,85534668	-0,09613037	0,08544922	33,81	0,00	0,00083826	1,39709E-08
25	-0,0213623	4,86961365	-0,12054443	0,10681152	33,81	0,00	0,00104782	1,74637E-08
26	-0,01983643	4,87205505	-0,13122559	0,09918213	33,81	0,00	0,00097298	1,62163E-08
27	-0,02105713	4,87312317	-0,03738403	0,10528564	33,81	0,00	0,00103285	1,72142E-08
28	-0,01159668	4,86373901	0,07019043	0,0579834	33,81	0,00	0,00056882	9,48029E-09
29	-0,01708984	4,85298157	-0,00991821	0,08544922	33,81	0,00	0,00083826	1,39709E-08
30	-0,02471924	4,86099243	-0,07324219	0,12359619	33,81	0,00	0,00121248	2,0208E-08
31	-0,02593994	4,86732483	0,03967285	0,12969971	33,81	0,00	0,00127235	2,12059E-08
32	-0,02441406	4,85603333	0,0328064	0,12207031	33,81	0,00	0,00119751	1,99585E-08

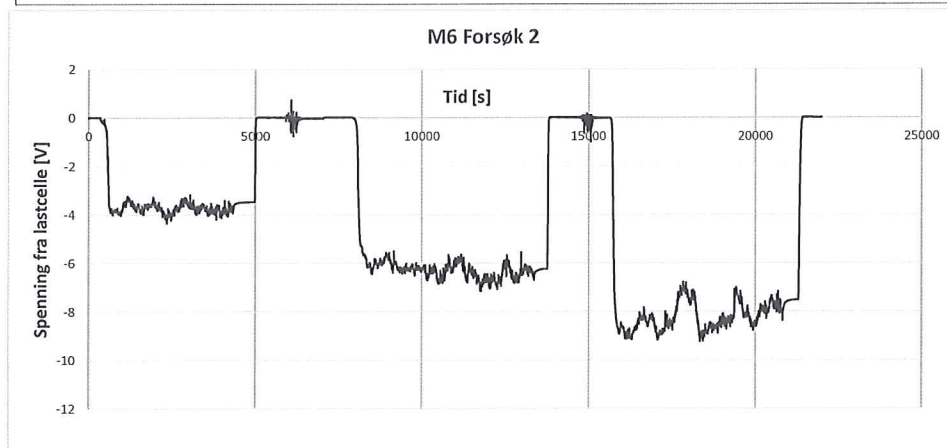
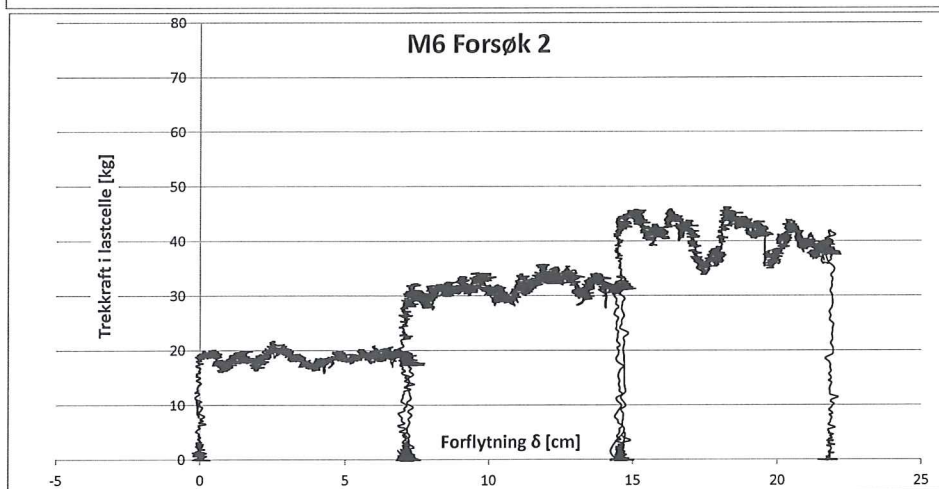
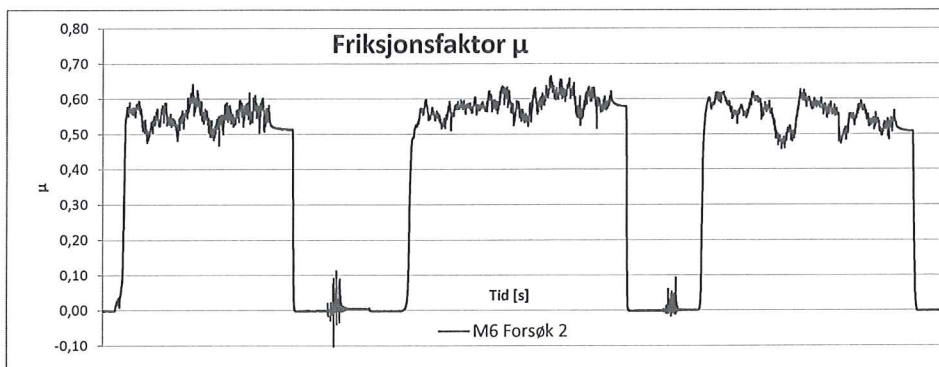
Materiale: M6: 8-16 mm knust pukkk fra Sundli Kral Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite
Serie nr: 11 Forsøk nr 1



Materiale: M6: 8-16 mm knust pukkk fra Sundli Kraal
Serie nr: 11

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite

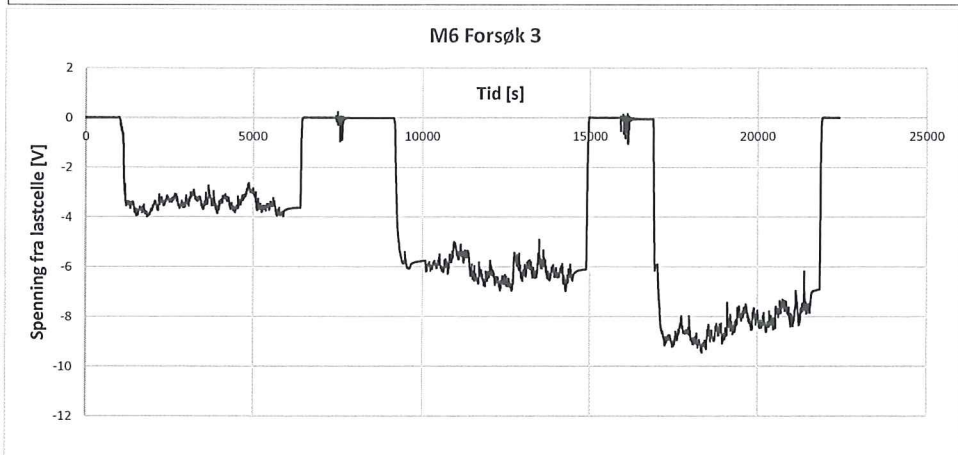
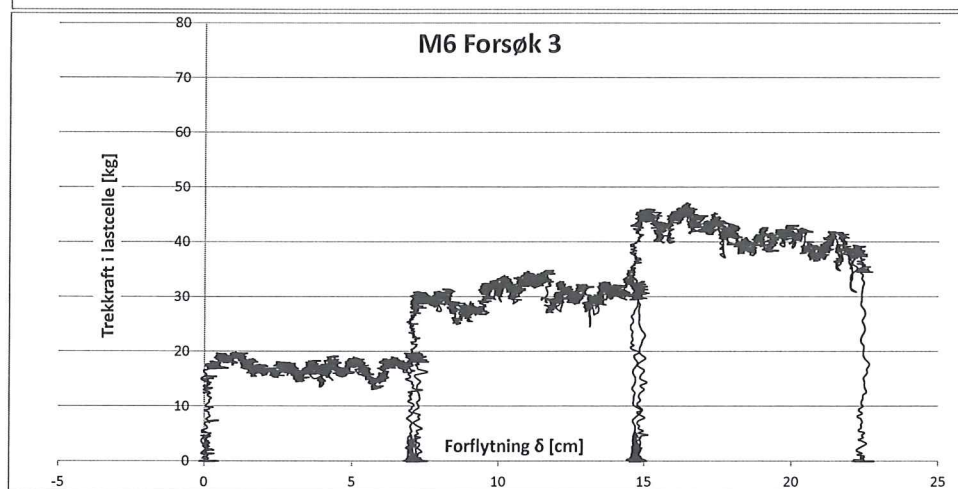
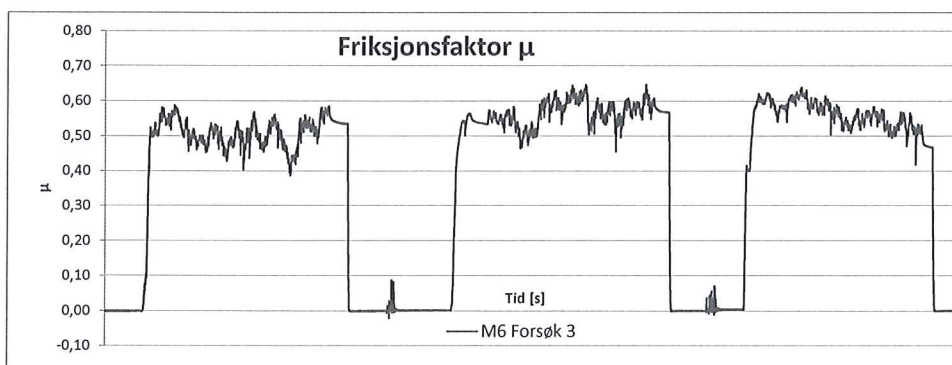
Forsøk nr 2



Materiale: M6: 8-16 mm knust pukk fra Sundli Krafl
Serie nr: 11

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite

Forsøk nr 3



Materiale:

M2, Stedlig masse Tverråne

Serie nr

12

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite Forsøk

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =		0,2 V endring i spenning
A	Areal prøve	60000 mm ²	
g	Gravitasjon	0,00981 m/s ²	
ζ	faktor lengde	-10 cm/V	
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81 kg	
	Lodd	20,00 kg	

Informasjon om forsøket:

Stedlig morenemasse fra grøfteside Tverråne kraftverk Nesbyen 9600 g prøve + plate + lodd + kasse

Tørr, klumper seg ikke ved sammenpressing i hånd se bilde tatt kl 19.35 . 5,0 cm slaglengde

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrett. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

Kjører fra 1 V og oppover på aktuator

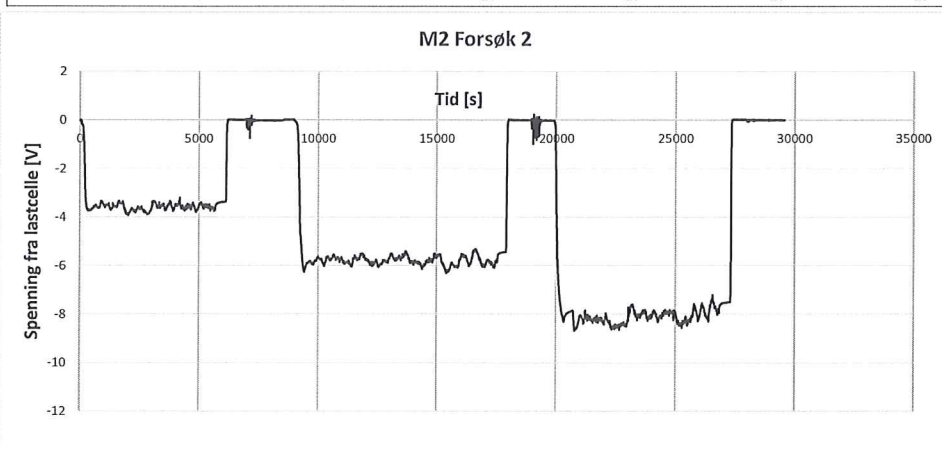
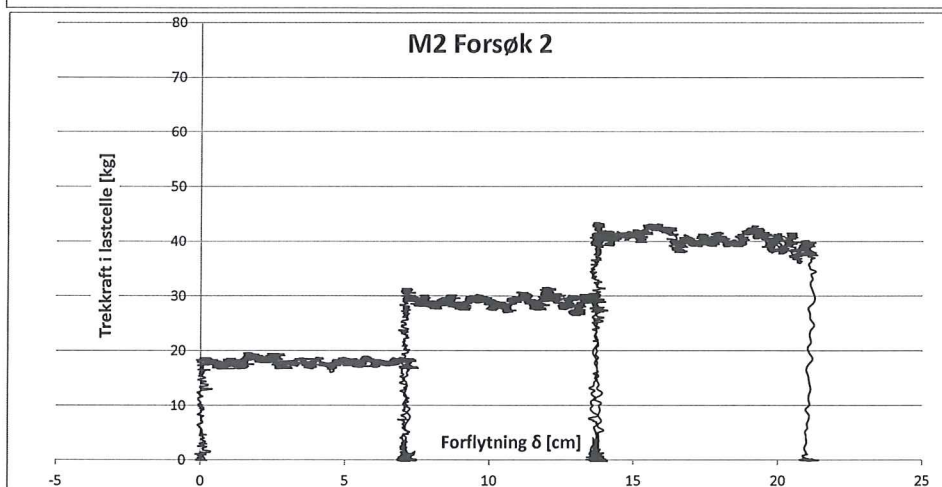
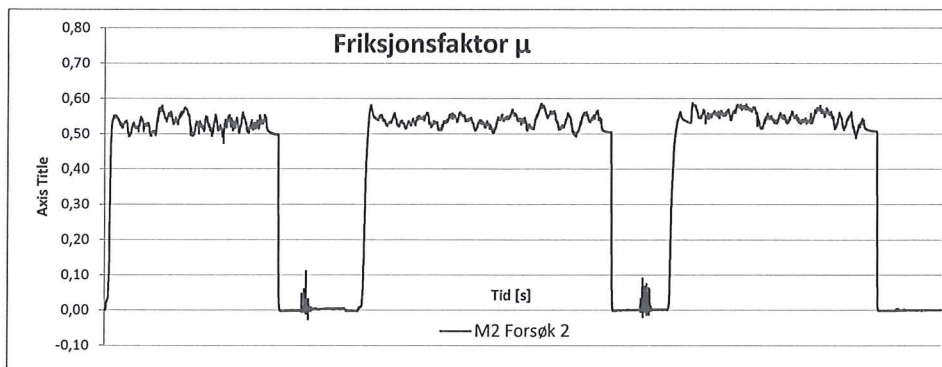
Problem at kassa heva seg 4-7 mm bak

M2 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkraft	Skjærspenning
Benevning	V _L [V]	V _A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			ΔV _A x ζ	V _L x λ		P / N	P x g	F / A
0	0,00732422	4,8815155	0,00915527	-0,03662109	33,81	0,00	-0,00035925	-5,98755E-09
1	0,00610352	4,88059998	0,09460449	-0,03051758	33,81	0,00	-0,00029938	-4,98962E-09
2	0,0100708	4,87205505	0,06408691	-0,050354	33,81	0,00	-0,00049397	-8,23288E-09
3	0,00854492	4,87510681	-0,0831604	-0,04272461	33,81	0,00	-0,00041913	-6,98547E-09
4	0,01159668	4,88983154	0,05111694	-0,0579834	33,81	0,00	-0,00056882	-9,48029E-09
5	0,01251221	4,87640381	0,0831604	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
6	0,01251221	4,87319946	-0,03356934	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
7	0,01342773	4,88487244	0,15487671	-0,06713867	33,81	0,00	-0,00065863	-1,09772E-08
8	0,01586914	4,86602783	0,11825562	-0,0793457	33,81	0,00	-0,00077838	-1,2973E-08
9	0,01678467	4,86968994	0,16174316	-0,08392334	33,81	0,00	-0,00082329	-1,37215E-08
10	0,01525879	4,86534119	0,1739502	-0,07629395	33,81	0,00	-0,00074844	-1,24741E-08
11	0,01586914	4,86412048	0,07400513	-0,0793457	33,81	0,00	-0,00077838	-1,2973E-08
12	0,01739502	4,87411499	0,18692017	-0,0869751	33,81	0,00	-0,00085323	-1,42204E-08
13	0,01495361	4,86282349	0,22277832	-0,07476807	33,81	0,00	-0,00073347	-1,22246E-08
14	0,01342773	4,85923767	0,08926392	-0,06713867	33,81	0,00	-0,00065863	-1,09772E-08
15	0,01159668	4,87258911	0,08544922	-0,0579834	33,81	0,00	-0,00056882	-9,48029E-09
16	0,01342773	4,87297058	0,01373291	-0,06713867	33,81	0,00	-0,00065863	-1,09772E-08
17	0,00915527	4,88014221	-0,01754761	-0,04577637	33,81	0,00	-0,00044907	-7,48444E-09
18	0,00976563	4,88327026	0,12435913	-0,04882813	33,81	0,00	-0,000479	-7,9834E-09
19	0,01251221	4,86907959	0,07095337	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
20	0,01312256	4,87442017	0,08773804	-0,06561279	33,81	0,00	-0,00064366	-1,07277E-08
21	0,01342773	4,8727417	0,06027222	-0,06713867	33,81	0,00	-0,00065863	-1,09772E-08
22	0,01586914	4,87548828	0,05111694	-0,0793457	33,81	0,00	-0,00077838	-1,2973E-08
23	0,01220703	4,87640381	0,07247925	-0,06103516	33,81	0,00	-0,00059875	-9,97925E-09
24	0,01281738	4,87426758	0,07858276	-0,06408691	33,81	0,00	-0,00062869	-1,04782E-08
25	0,01586914	4,87365723	0,10375977	-0,0793457	33,81	0,00	-0,00077838	-1,2973E-08
26	0,01464844	4,87113953	0,06637573	-0,07324219	33,81	0,00	-0,00071851	-1,19751E-08
27	0,01251221	4,87487793	0,12588501	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
28	0,01190186	4,868927	0,09841919	-0,05950928	33,81	0,00	-0,00058379	-9,72977E-09
29	0,00854492	4,87167358	0,12664795	-0,04272461	33,81	0,00	-0,00041913	-6,98547E-09
30	0,00671387	4,86885071	-0,01296997	-0,03356934	33,81	0,00	-0,00032932	-5,48859E-09
31	0,00396729	4,8828125	0,12130737	-0,01983643	33,81	0,00	-0,0001946	-3,24326E-09
32	-0,00030518	4,86938477	-0,01525879	0,00152588	33,81	0,00	1,4969E-05	2,49481E-10
33	-0,00061035	4,88304138	0,10070801	0,00305176	33,81	0,00	2,9938E-05	4,98962E-10
34	0,00152588	4,8714447	0,09841919	-0,00762939	33,81	0,00	-7,4844E-05	-1,24741E-09
35	-0,00091553	4,87167358	0,10910034	0,00457764	33,81	0,00	4,4907E-05	7,48444E-10
36	0,00244141	4,87060547	0,0793457	-0,01220703	33,81	0,00	-0,00011975	-1,99585E-09
37	0,00274658	4,87358093	0,1373291	-0,01373291	33,81	0,00	-0,00013472	-2,24533E-09

Materiale: M2, Stedlig masse Tverråne
Serie nr: 12 Forsøk nr 2

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite



0

Stedlig morenemasse fra grøfteside Tverråne kraftverk Nesbyen 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Tørr, klumper seg ikke ved sammenpressing i hånd 14.11 . 5,0 cm slaglengde
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyd
Kjører fra ca 3V og oppover på aktuator
Kassa heva seg bare 1-3 mm bak

Materiale:

M4 Naturmasser Ekle

Serie nr

13

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite Forsøk

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =	0,2	V endring i spenning
A	Areal prøve	60000	mm ²
g	Gravitasjon	0,00981	m/s ²
ζ	faktor lengde	-10	cm/V
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81	kg
	Lodd	20,00	kg

Informasjon om forsøket:

Skrapmasse fra Ekle sandtak Trondheim 9600 g prøve + plate + lodd + kasse

Knusk tørr, klumper seg ikke ved sammenpressing i hånd, støver ved oppøsning. 2,5 cm slaglengde

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

Kjører med konstant trekkfart, 2. pålasting måtte spenninga skrues opp for å få den til å gå, derfor hakket.

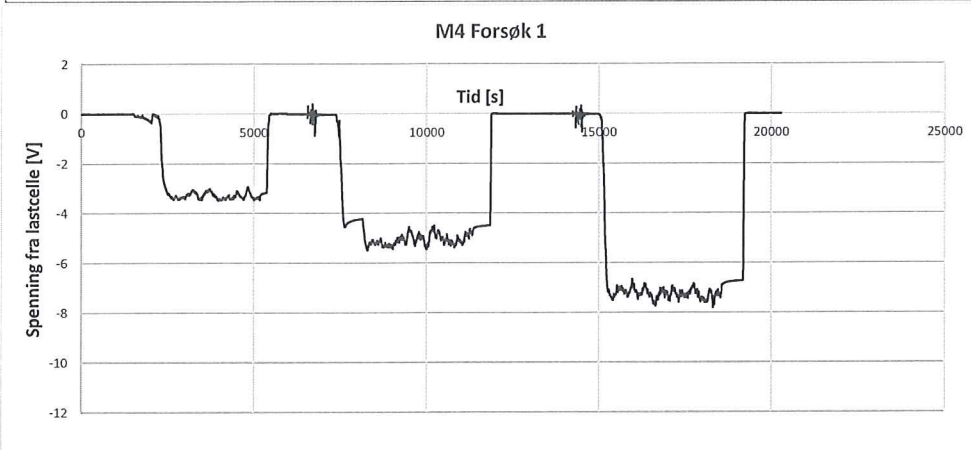
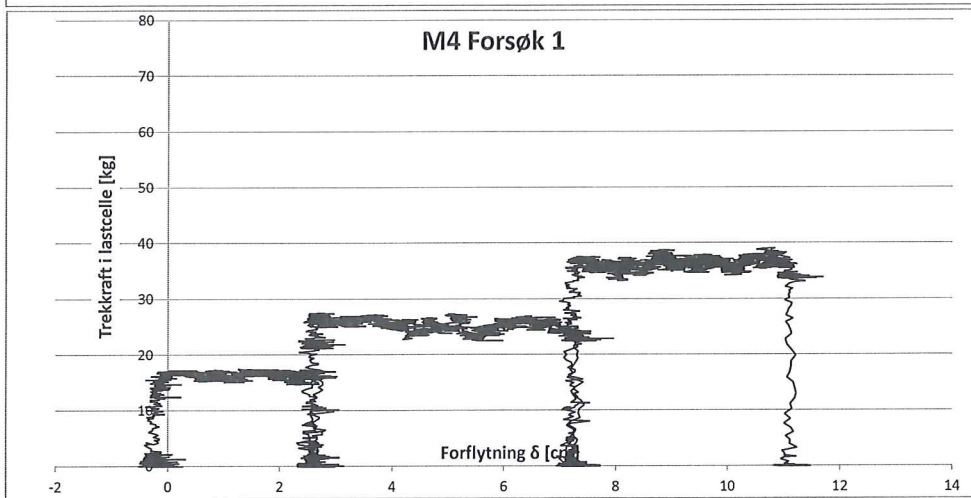
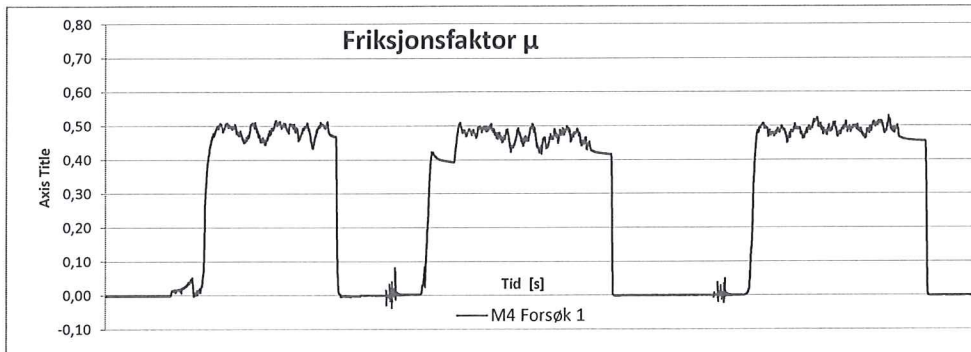
Kassa heva seg 2-4 mm bak, kassa skled noe over på sida (0,5 cm) uten at det bør påvirke resultatet veldig.

M4 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkkraft	Skjærspenning
Benevning	V_L [V]	V_A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			$\Delta V_A \times \zeta$	$V_L \times \lambda$		P / N	P x g	F / A
0	0,00427246	4,82025146	-0,17089844	-0,0213623	33,81	0,00	-0,00020956	-3,49274E-09
1	0,00976563	4,83734131	-0,16098022	-0,04882813	33,81	0,00	-0,000479	-7,9834E-09
2	0,01037598	4,83634949	-0,12512207	-0,05187988	33,81	0,00	-0,00050894	-8,48236E-09
3	0,0100708	4,83276367	-0,16555786	-0,050354	33,81	0,00	-0,00049397	-8,23288E-09
4	0,00732422	4,83680725	-0,09841919	-0,03662109	33,81	0,00	-0,00035925	-5,98755E-09
5	0,00640869	4,83009338	-0,20446777	-0,03204346	33,81	0,00	-0,00031435	-5,23911E-09
6	0,00030518	4,84069824	-0,27160645	-0,00152588	33,81	0,00	-1,4969E-05	-2,49481E-10
7	-0,00366211	4,84741211	-0,27770996	0,01831055	33,81	0,00	0,00017963	2,99377E-09
8	-0,00366211	4,84802246	-0,20904541	0,01831055	33,81	0,00	0,00017963	2,99377E-09
9	-0,00305176	4,84115601	-0,21820068	0,01525879	33,81	0,00	0,00014969	2,49481E-09
10	0	4,84207153	-0,16174316	0	33,81	0,00	0	0
11	0,00335693	4,83642578	-0,27313232	-0,01678467	33,81	0,00	-0,00016466	-2,74429E-09
12	0,00396729	4,8475647	-0,35476685	-0,01983643	33,81	0,00	-0,0001946	-3,24326E-09
13	0,00579834	4,85572815	-0,3364563	-0,0289917	33,81	0,00	-0,00028441	-4,74014E-09
14	0,00640869	4,85389709	-0,24032593	-0,03204346	33,81	0,00	-0,00031435	-5,23911E-09
15	0,00671387	4,84428406	-0,3364563	-0,03356934	33,81	0,00	-0,00032932	-5,48859E-09
16	0,0012207	4,85389709	0,04272461	-0,00610352	33,81	0,00	-5,9875E-05	-9,97925E-10
17	0,00213623	4,815979	-0,340271	-0,01068115	33,81	0,00	-0,00010478	-1,74637E-09
18	0,00244141	4,85427856	-0,39978027	-0,01220703	33,81	0,00	-0,00011975	-1,99585E-09
19	0,00610352	4,86022949	-0,29296875	-0,03051758	33,81	0,00	-0,00029938	-4,98962E-09
20	0,00976563	4,84954834	-0,18463135	-0,04882813	33,81	0,00	-0,000479	-7,9834E-09
21	0,01220703	4,8387146	-0,18920898	-0,06103516	33,81	0,00	-0,00059875	-9,97925E-09
22	0,01220703	4,83917236	0,01678467	-0,06103516	33,81	0,00	-0,00059875	-9,97925E-09
23	0,01251221	4,818573	-0,26702881	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
24	0,00793457	4,84695435	-0,23040771	-0,03967285	33,81	0,00	-0,00038919	-6,48651E-09
25	0,00274658	4,84329224	-0,3326416	-0,01373291	33,81	0,00	-0,00013472	-2,24533E-09
26	-0,00061035	4,85351563	-0,28991699	0,00305176	33,81	0,00	2,9938E-05	4,98962E-10
27	-0,00396729	4,84924316	-0,40206909	0,01983643	33,81	0,00	0,0001946	3,24326E-09
28	-0,00274658	4,86045837	-0,24795532	0,01373291	33,81	0,00	0,00013472	2,24533E-09
29	0	4,845047	-0,27084351	0	33,81	0,00	0	0
30	0,00305176	4,84733582	-0,33111572	-0,01525879	33,81	0,00	-0,00014969	-2,49481E-09
31	0,0088501	4,85336304	-0,42190552	-0,04425049	33,81	0,00	-0,0004341	-7,23495E-09
32	0,0012207	4,86244202	-0,16937256	-0,00610352	33,81	0,00	-5,9875E-05	-9,97925E-10
33	0,00213623	4,83718872	-0,27389526	-0,01068115	33,81	0,00	-0,00010478	-1,74637E-09
34	0,00030518	4,84764099	-0,23422241	-0,00152588	33,81	0,00	-1,4969E-05	-2,49481E-10
35	0,00732422	4,84367371	-0,20751953	-0,03662109	33,81	0,00	-0,00035925	-5,98755E-09
36	0,01068115	4,84100342	-0,24719238	-0,05340576	33,81	0,00	-0,00052391	-8,73184E-09
37	0,01220703	4,8449707	-0,1991272	-0,06103516	33,81	0,00	-0,00059875	-9,97925E-09

Materiale: M4 Naturmasser Ekle
Serie nr: 13 Forsøk nr 1

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite

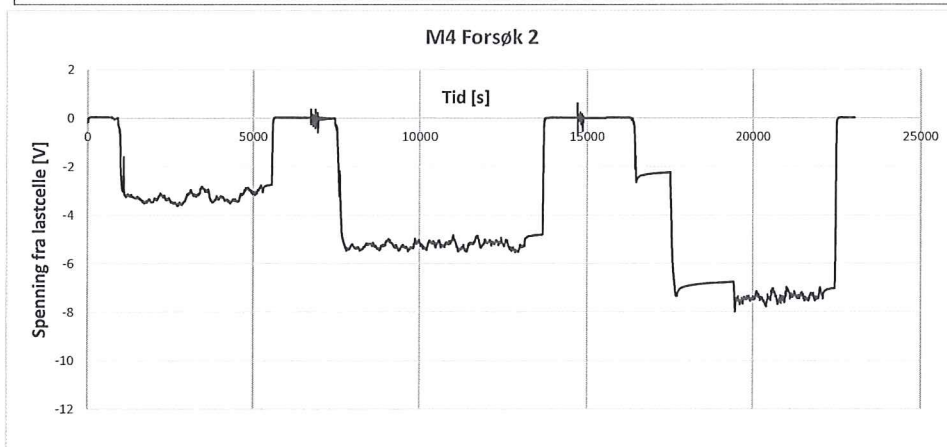
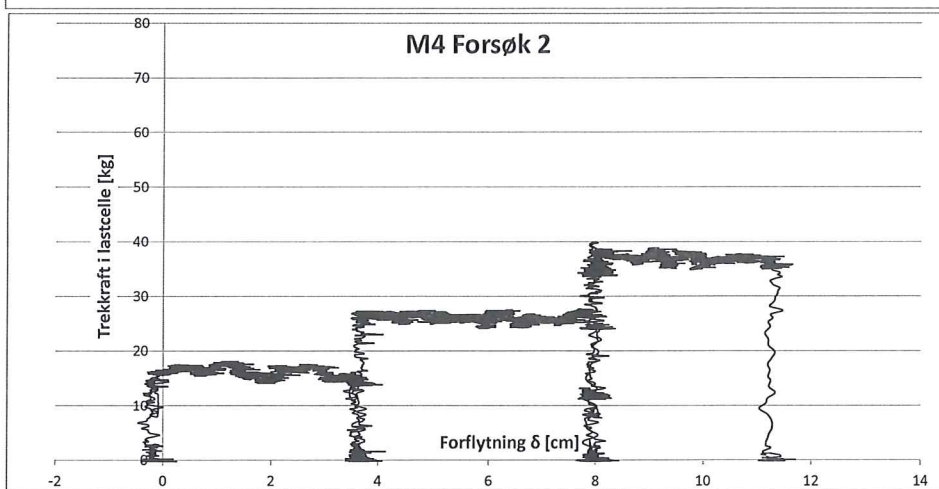
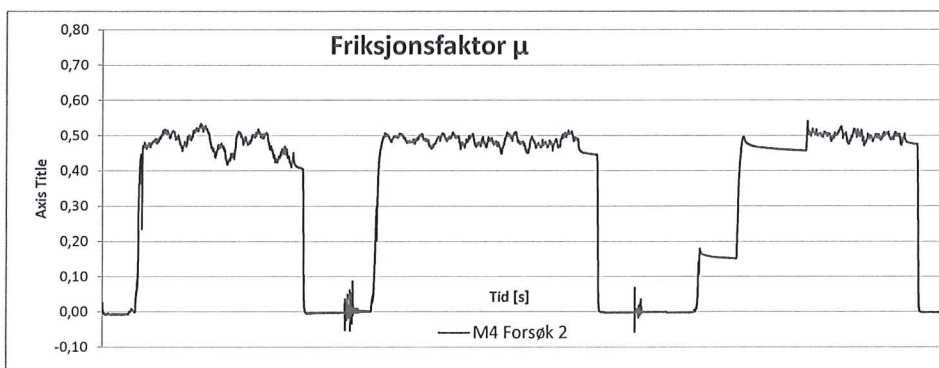


0
Skrapmasse fra Ekle sandtak Trondheim 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Knusk tørr, klumper seg ikke ved sammenpressing i hånd, støver ved oppøsning. 2,5 cm slaglengde
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører med konstant trekkfart, 2. pålasting måtte spenninga skrues opp for å få den til å gå, derfor hakket.
Kassa heva seg 2-4 mm bak, kassa skled noe over på sida (0,5 cm) uten at det bør påvirke resultatet veldig.

0

Materiale: M4 Naturmasser Ekle
Serie nr: 13 Forsøk nr 2

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite

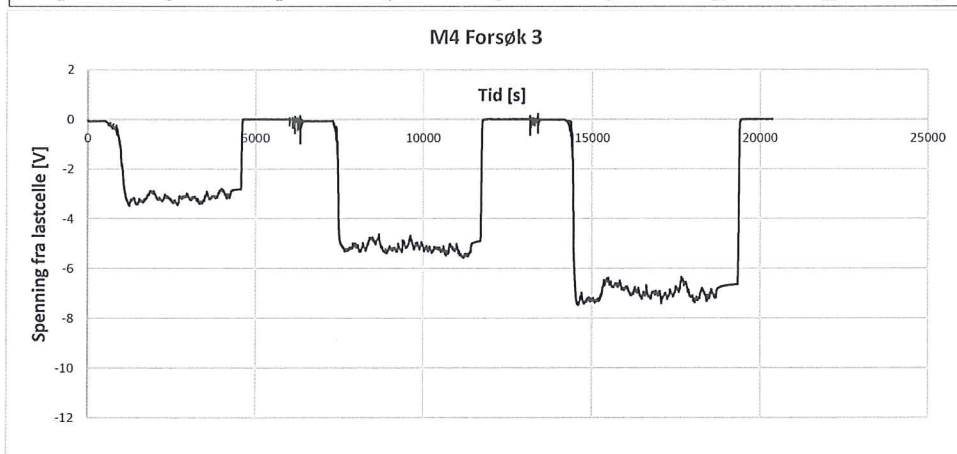
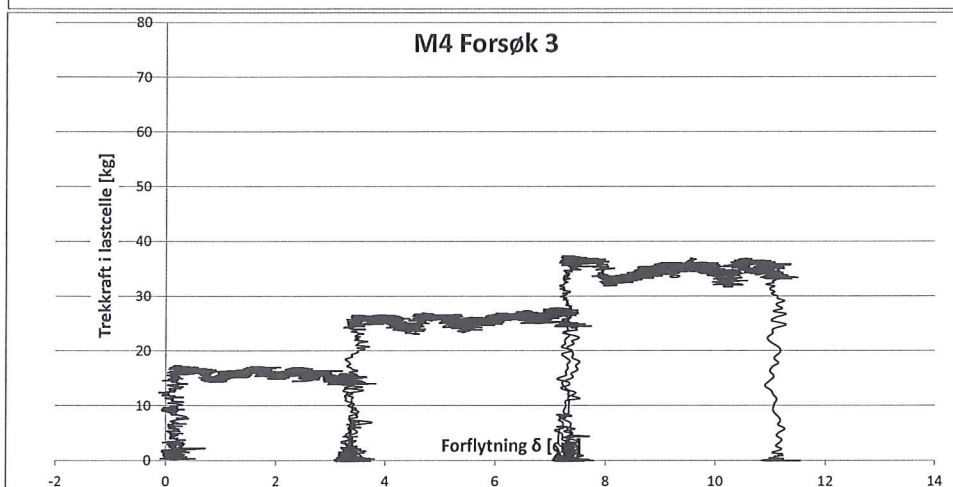
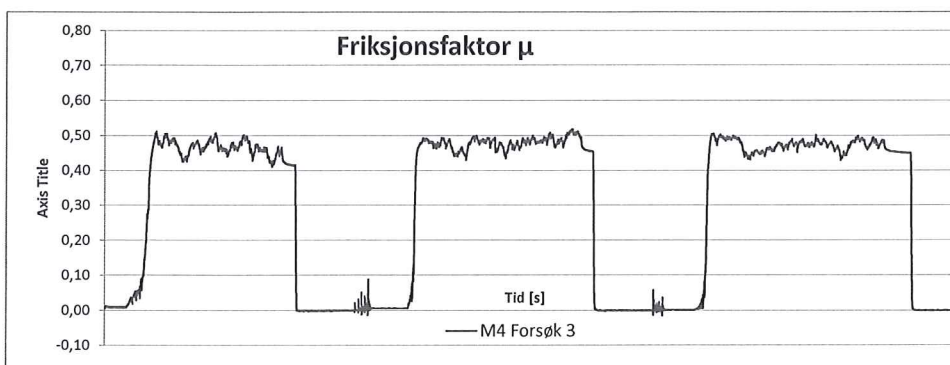


0

Serie 2 Skrapmasse fra Ekle sandtak Trondheim 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Knusk tørr, klumper seg ikke ved sammenpressing i hånd, støver ved oppøsning. 2,5 cm slaglengde
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høydd
Kjører med konstant trekkfart, 3. pålasting måtte spenninga skrues opp for å få den til å gå, derfor hakket.
Kassa heva seg 1-3 mm bak

Materiale: M4 Naturmasser Ekle
Serie nr: 13 Forsøk nr 3

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite



0

Serie 3 Skrapmasse fra Ekle sandtak Trondheim 9600 g prøve + plate + lodd + kasse
Tørr, klumper seg ikke ved sammenpressing i hånd, svak støvning ved oppøsning. 2,5 cm slaglengde
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører med konstant trekkfart på hvert lodd
Kassa heva seg 1-3 mm bak

0

Materiale:

M5 svart sandig, grusig jord

Serie nr

14

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite Forsøk

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =	0,2	V endring i spenning
A	Areal prøve	60000	mm ²
g	Gravitasjon	0,00981	m/s ²
ζ	faktor lengde	-10	cm/V
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81	kg
	Lodd	20,00	kg

Informasjon om forsøket:

Serie 1 Sikta jord fra Kronn Maskin 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP

jord-tørr, klumper seg moderat ved sammenpressing i hånd . 2,5 cm slaglengde

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

Kjører konstant fart på hver pålasting

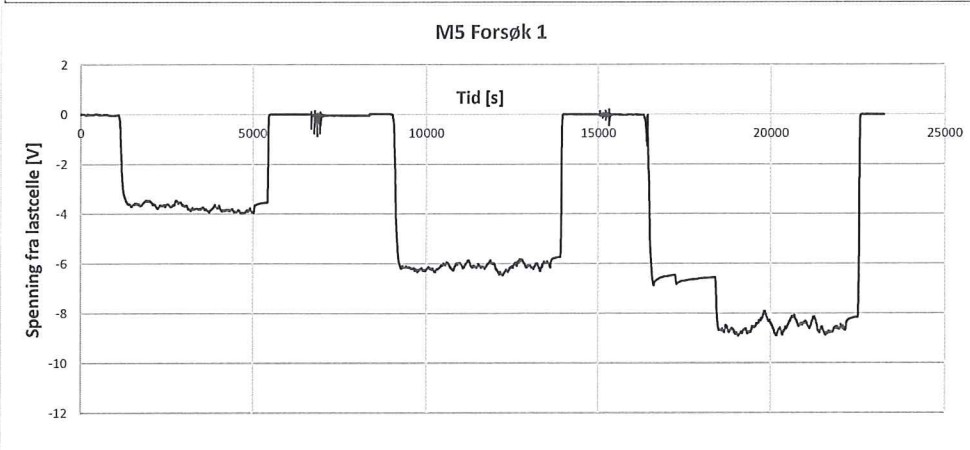
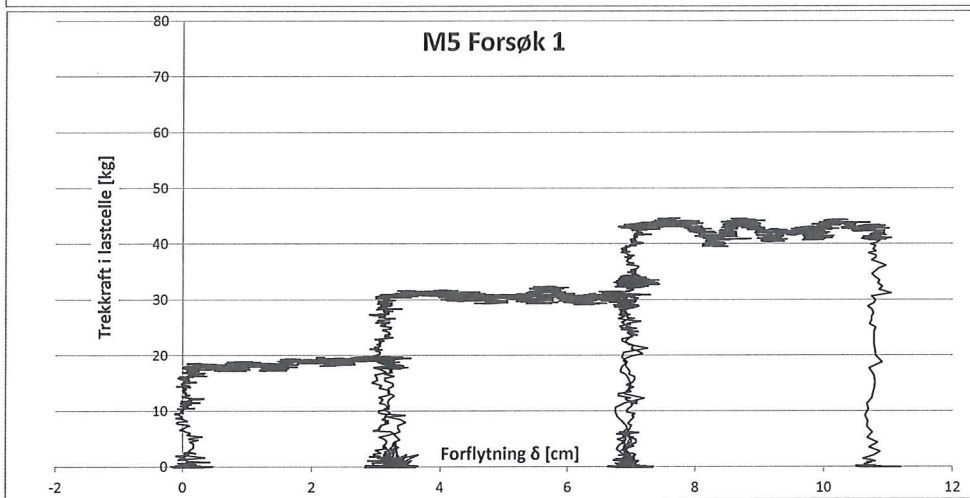
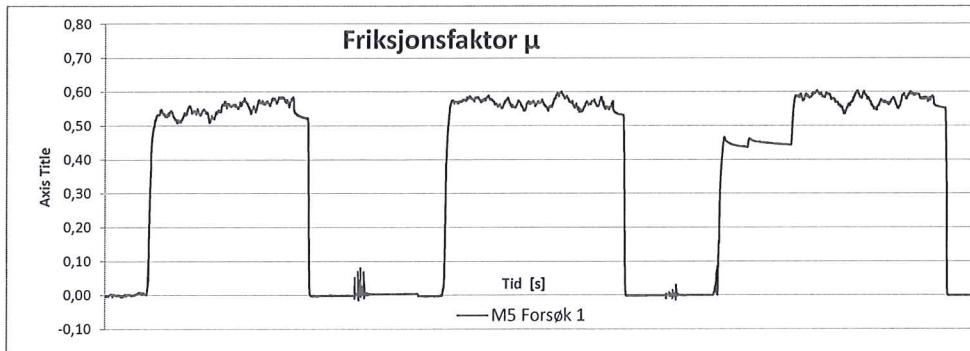
Kassa heva ikke bak, lite korn som ligger igjen

M5 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkkraft	Skjærspenning
Benevning	V_i [V]	V_A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			$\Delta V_A \times \zeta$	$V_i \times \lambda$		P / N	P x g	F / A
0	0,01312256	4,85458374	0,13809204	-0,0656128	33,81	0,00	-0,00064366	-1,07277E-08
1	0,01342773	4,84077454	0,08926391	-0,06713867	33,81	0,00	-0,00065863	-1,09772E-08
2	0,01647949	4,84565735	0,05950927	-0,08239746	33,81	0,00	-0,00080832	-1,3472E-08
3	0,01617432	4,84863281	0,00991821	-0,08087158	33,81	0,00	-0,00079335	-1,32225E-08
4	0,01586914	4,85359192	0,00686645	-0,07934571	33,81	0,00	-0,00077838	-1,2973E-08
5	0,01708984	4,8538971	0,05340576	-0,08544922	33,81	0,00	-0,00083826	-1,39709E-08
6	0,01617432	4,84924316	0,02593994	-0,08087158	33,81	0,00	-0,00079335	-1,32225E-08
7	0,00946045	4,85198975	-0,03509522	-0,04730225	33,81	0,00	-0,00046404	-7,73392E-09
8	0,01342773	4,85809326	-0,01525879	-0,06713867	33,81	0,00	-0,00065863	-1,09772E-08
9	0,00976563	4,85610962	-0,14038086	-0,04882813	33,81	0,00	-0,000479	-7,9834E-09
10	0,01098633	4,86862183	-0,00228882	-0,05493164	33,81	0,00	-0,00053888	-8,98132E-09
11	0,00915527	4,85481262	0,03204345	-0,04577637	33,81	0,00	-0,00044907	-7,48444E-09
12	0,01373291	4,8513794	0,00915527	-0,06866455	33,81	0,00	-0,0006736	-1,12267E-08
13	0,01251221	4,85366821	-0,01907349	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
14	0,01251221	4,85649109	-0,0366211	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
15	0,01525879	4,85824585	0,01373291	-0,07629395	33,81	0,00	-0,00074844	-1,24741E-08
16	0,01403809	4,85321045	-0,09231568	-0,07019043	33,81	0,00	-0,00068857	-1,14761E-08
17	0,01373291	4,86381531	0,01144409	-0,06866455	33,81	0,00	-0,0006736	-1,12267E-08
18	0,01556397	4,85343933	0,07171631	-0,07781983	33,81	0,00	-0,00076341	-1,27235E-08
19	0,01831055	4,84741211	0,03967285	-0,09155274	33,81	0,00	-0,00089813	-1,49689E-08
20	0,01983643	4,85061646	0,12893677	-0,09918213	33,81	0,00	-0,00097298	-1,62163E-08
21	0,02105713	4,84169006	0,04119873	-0,10528565	33,81	0,00	-0,00103285	-1,72142E-08
22	0,02166748	4,85046387	0,16555786	-0,1083374	33,81	0,00	-0,00106279	-1,77132E-08
23	0,0189209	4,83802795	0,09765625	-0,09460449	33,81	0,00	-0,00092807	-1,54678E-08
24	0,01953125	4,84481812	0,00915527	-0,09765625	33,81	0,00	-0,00095801	-1,59668E-08
25	0,01800537	4,85366821	0,45471191	-0,09002686	33,81	0,00	-0,00088316	-1,47194E-08
26	0,01861572	4,80911255	0,09841919	-0,09307862	33,81	0,00	-0,0009131	-1,52184E-08
27	0,02044678	4,84474182	0,15106201	-0,10223389	33,81	0,00	-0,00100291	-1,67152E-08
28	0,01831055	4,83947754	-0,01907349	-0,09155274	33,81	0,00	-0,00089813	-1,49689E-08
29	0,01556397	4,85649109	0,10070801	-0,07781983	33,81	0,00	-0,00076341	-1,27235E-08
30	0,01159668	4,84451294	0,06256103	-0,0579834	33,81	0,00	-0,00056882	-9,48029E-09
31	0,0076294	4,84832764	0,07476806	-0,03814698	33,81	0,00	-0,00037422	-6,23703E-09
32	0,00579834	4,84710693	-0,04119873	-0,0289917	33,81	0,00	-0,00028441	-4,74014E-09
33	0,00518799	4,85870361	0,00381469	-0,02593994	33,81	0,00	-0,00025447	-4,24118E-09
34	0,00549316	4,85420227	-0,03433228	-0,02746582	33,81	0,00	-0,00026944	-4,49066E-09
35	0,00732422	4,85801697	0,05111694	-0,0366211	33,81	0,00	-0,00035925	-5,98755E-09
36	0,00457764	4,84947205	0,01907348	-0,02288819	33,81	0,00	-0,00022453	-3,74222E-09
37	0,00732422	4,85267639	0,11978149	-0,0366211	33,81	0,00	-0,00035925	-5,98755E-09

Materiale: M5 svart sandig, grusig jord
Serie nr: 14 Forsøk nr 1

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite



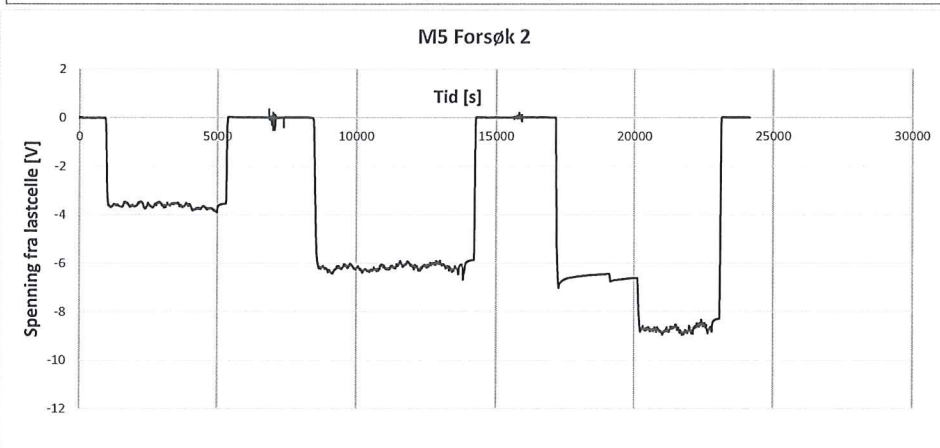
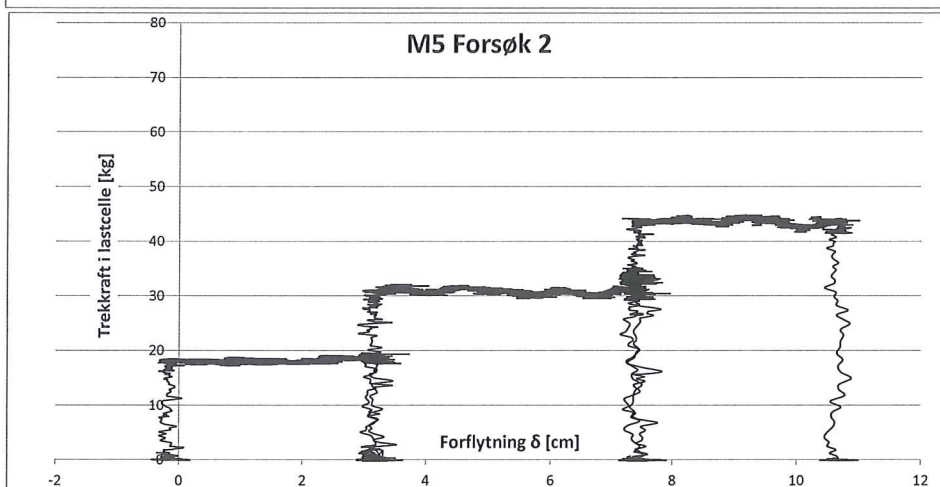
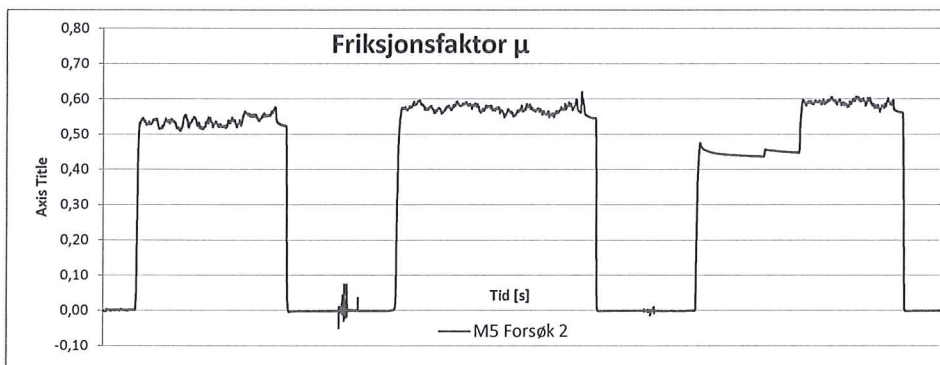
0

Serie 1 Sikta jord fra Kronn Maskin 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP
jord-tørr, klumper seg moderat ved sammenpressing i hånd . 2,5 cm slaglengde
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører konstant fart på hver pålasting
Kassa heva ikke bak, lite korn som ligger igjen

0

Materiale: M5 svart sandig, grusig jord
Serie nr: 14 Forsøk nr 2

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite

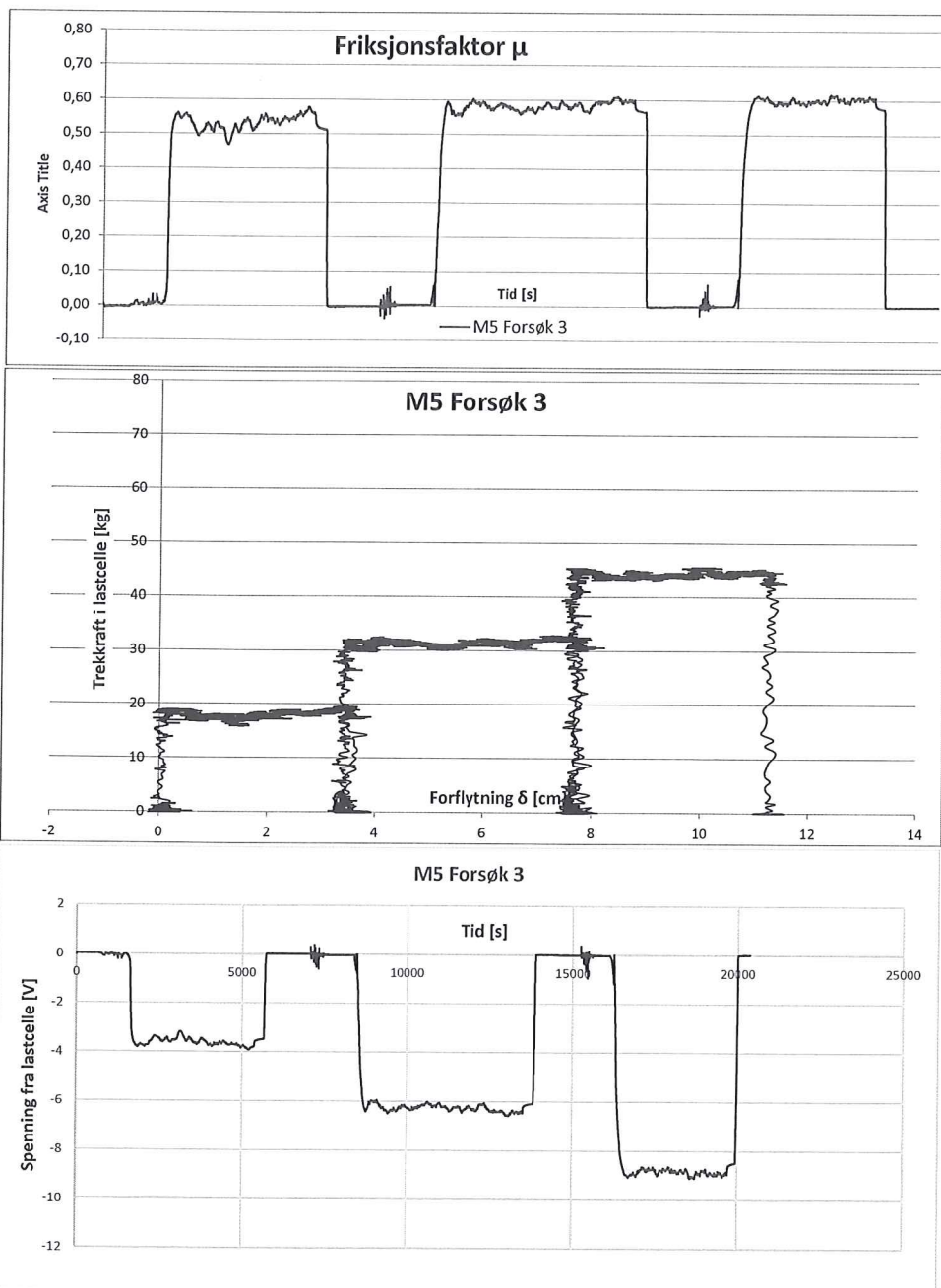


0

Serie 2 Sikta jord fra Kronn Maskin 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP
jord-tørr, klumper seg moderat ved sammenpressing i hånd . 2,5 cm slaglengde
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører konstant fart på hver pålasting
Kassa heva seg ikke bak, lite korn som ligger igjen. Siste pålasting klarte ikke motoren å dra det med instilt spenning, måtte justere litt for å få den i gang

Materiale: M5 svart sandig, grusig jord
Serie nr: 14 Forsøk nr 3

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite



0
Serie 3 Sikta jord fra Kronn Maskin 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP
jord-tørr, klumper seg moderat ved sammenpressing i hånd . Bilde tatt 24.09. klokken 1920, 2,5 cm slaglengde
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører konstant fart på hver pålasting
Kassa heva seg ikke bak, lite korn som ligger igjen.
0

Materiale:

M7 16-22 mm pukk Tverråne

Serie nr

15

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite Forsøk

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =	0,2	V endring i spenning
A	Areal prøve	60000	mm ²
g	Gravitasjon	0,00981	m/s ²
ζ	faktor lengde	-10	cm/V
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81	kg
	Lodd	20,00	kg

Informasjon om forsøket:

Serie 1 grov pukk ca 16-22 avrunda korn moderat knust fra Tverråne Nesbyen 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP

Tørr 2,5 cm slaglengde

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

Kjører fast fart på sylindere på hver pålasting

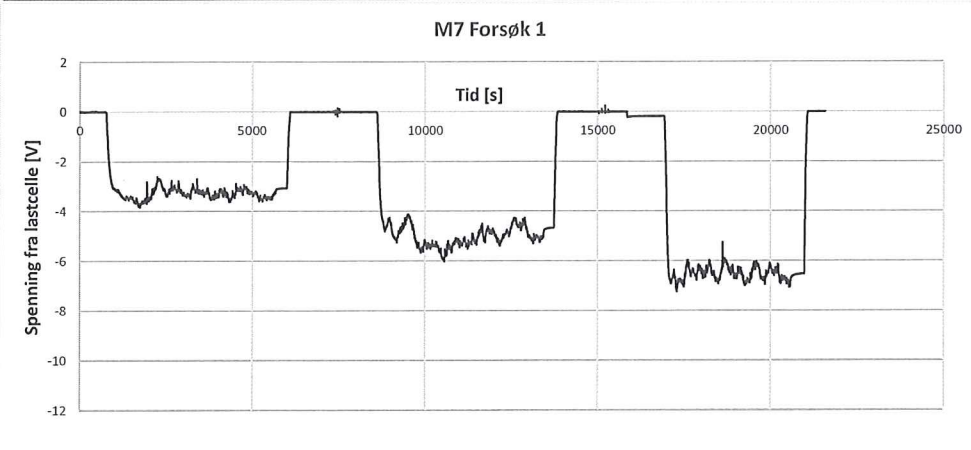
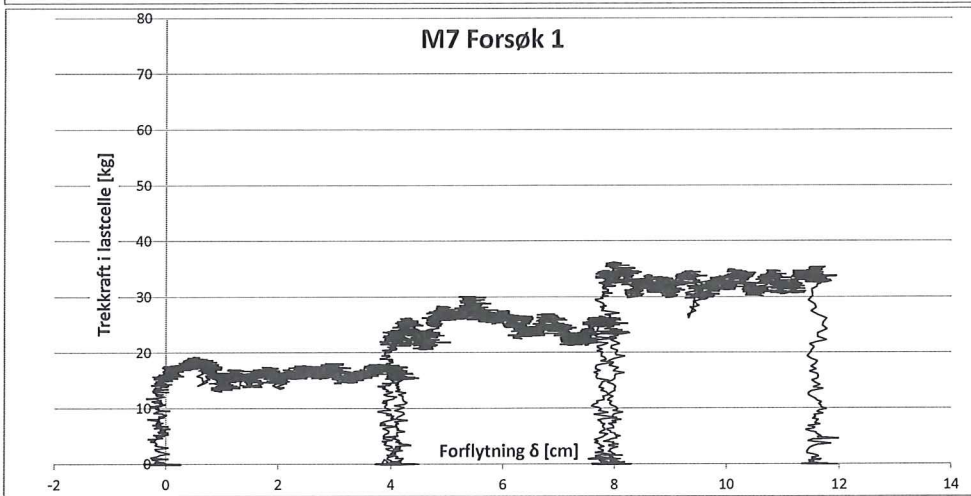
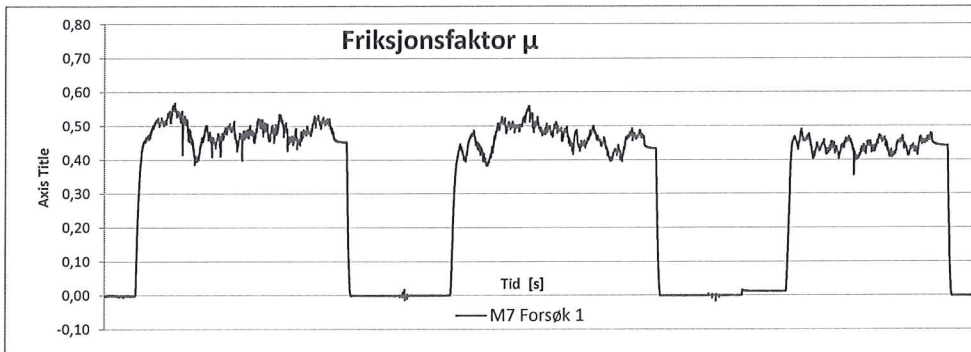
Kassa hever seg ikke bak og det ligger ikke igjen korn etter kassa

M7 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkraft	Skjærspenning
Benevning	V _L [V]	V _A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			ΔV _A × ζ	V _L × λ		P / N	P × g	F / A
0	0,00823975	4,89776611	-0,23117066	-0,04119873	33,81	0,00	-0,00040416	-6,73599E-09
1	0,00335693	4,92088318	-0,13275147	-0,01678467	33,81	0,00	-0,00016466	-2,74429E-09
2	0,00518799	4,91104126	-0,24032593	-0,02593994	33,81	0,00	-0,00025447	-4,24118E-09
3	0,00579834	4,92179871	-0,07705689	-0,0289917	33,81	0,00	-0,00028441	-4,74014E-09
4	0,01068115	4,9054718	-0,07400513	-0,05340576	33,81	0,00	-0,00052391	-8,73184E-09
5	0,0112915	4,90516663	-0,09002686	-0,05645752	33,81	0,00	-0,00055385	-9,2308E-09
6	0,01525879	4,9067688	-0,12741089	-0,07629395	33,81	0,00	-0,00074844	-1,24741E-08
7	0,01586914	4,9105072	-0,00610352	-0,07934571	33,81	0,00	-0,00077838	-1,2973E-08
8	0,01251221	4,89837647	-0,04196167	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
9	0,01434326	4,90196228	-0,025177	-0,07171631	33,81	0,00	-0,00070354	-1,17256E-08
10	0,01220703	4,90028381	-0,07781983	-0,06103516	33,81	0,00	-0,00059875	-9,97925E-09
11	0,0100708	4,9055481	-0,05569458	-0,05035401	33,81	0,00	-0,00049397	-8,23288E-09
12	0,01098633	4,90333557	-0,08392334	-0,05493164	33,81	0,00	-0,00053888	-8,98132E-09
13	0,00488281	4,90615845	-0,1953125	-0,02441407	33,81	0,00	-0,0002395	-3,9917E-09
14	0,00183106	4,91729736	-0,07781983	-0,00915528	33,81	0,00	-8,9813E-05	-1,49689E-09
15	-0,0012207	4,9055481	-0,22277832	0,00610352	33,81	0,00	5,9875E-05	9,97925E-10
16	0,00061035	4,92004395	-0,2029419	-0,00305176	33,81	0,00	-2,9938E-05	-4,98963E-10
17	0,0012207	4,9180603	-0,16479492	-0,00610352	33,81	0,00	-5,9875E-05	-9,97925E-10
18	0,00335693	4,91424561	-0,16174317	-0,01678467	33,81	0,00	-0,00016466	-2,74429E-09
19	0,00640869	4,91394043	-0,01296997	-0,03204346	33,81	0,00	-0,00031435	-5,2391E-09
20	0,00610352	4,89906311	-0,13198853	-0,03051758	33,81	0,00	-0,00029938	-4,98962E-09
21	0,0112915	4,91096497	-0,11367798	-0,05645752	33,81	0,00	-0,00055385	-9,2308E-09
22	0,0076294	4,90913391	-0,13046265	-0,03814698	33,81	0,00	-0,00037422	-6,23703E-09
23	0,01068115	4,91081238	-0,13275147	-0,05340576	33,81	0,00	-0,00052391	-8,73184E-09
24	0,01190186	4,91104126	-0,08544922	-0,05950928	33,81	0,00	-0,00058379	-9,72977E-09
25	0,00823975	4,90631104	-0,06332398	-0,04119873	33,81	0,00	-0,00040416	-6,73599E-09
26	0,00518799	4,90409851	-0,27618408	-0,02593994	33,81	0,00	-0,00025447	-4,24118E-09
27	0,00335693	4,92538452	-0,20523072	-0,01678467	33,81	0,00	-0,00016466	-2,74429E-09
28	0,00335693	4,91828919	-0,11520386	-0,01678467	33,81	0,00	-0,00016466	-2,74429E-09
29	0,00640869	4,9092865	-0,07934571	-0,03204346	33,81	0,00	-0,00031435	-5,2391E-09
30	0,00640869	4,90570068	-0,15335083	-0,03204346	33,81	0,00	-0,00031435	-5,2391E-09
31	0,01251221	4,9131012	0,03051758	-0,06256104	33,81	0,00	-0,00061372	-1,02287E-08
32	0,0177002	4,89471436	-0,09231568	-0,08850098	33,81	0,00	-0,00086819	-1,44699E-08
33	0,01159668	4,90699768	-0,07400513	-0,0579834	33,81	0,00	-0,00056882	-9,48029E-09
34	0,01098633	4,90516663	-0,07324219	-0,05493164	33,81	0,00	-0,00053888	-8,98132E-09
35	0,00640869	4,90509033	0,27542114	-0,03204346	33,81	0,00	-0,00031435	-5,2391E-09
36	0,00091553	4,870224	-0,28457642	-0,00457764	33,81	0,00	-4,4907E-05	-7,48443E-10
37	0,00061035	4,92622376	-0,1411438	-0,00305176	33,81	0,00	-2,9938E-05	-4,98963E-10

Materiale: M7 16-22 mm pukk Tverråne
Serie nr: 15 Forsøk nr 1

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite

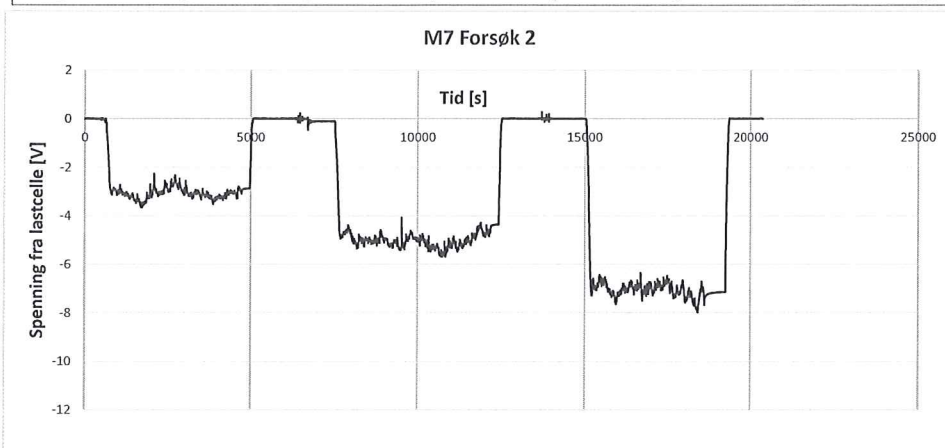
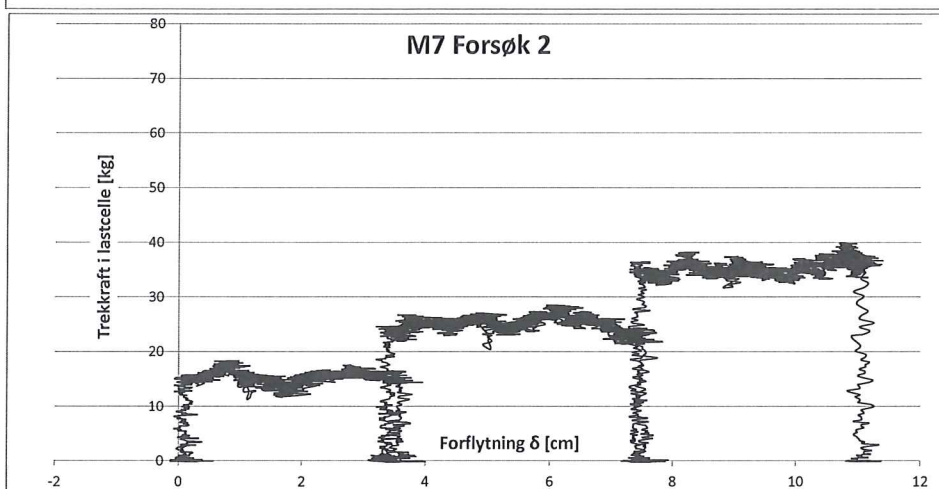
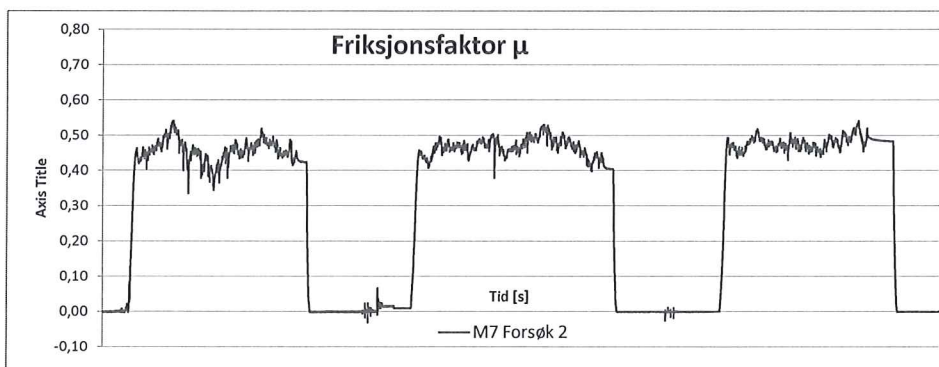


0
Serie 1 grov pukk ca 16-22 avrunda korn moderat knust fra Tverråne Nesbyen 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP
Tørr 2,5 cm slaglengde
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting
Kassa hever seg ikke bak og det ligger ikke igjen korn etter kassa

0

Materiale: M7 16-22 mm pukkk Tverråne
Serie nr: 15 Forsøk nr 2

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite



0

Serie 2 grov pukkk ca 16-22 avrunda korn moderat knust fra Tverråne Nesbyen 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP

Tørr 2,5 cm slaglengde

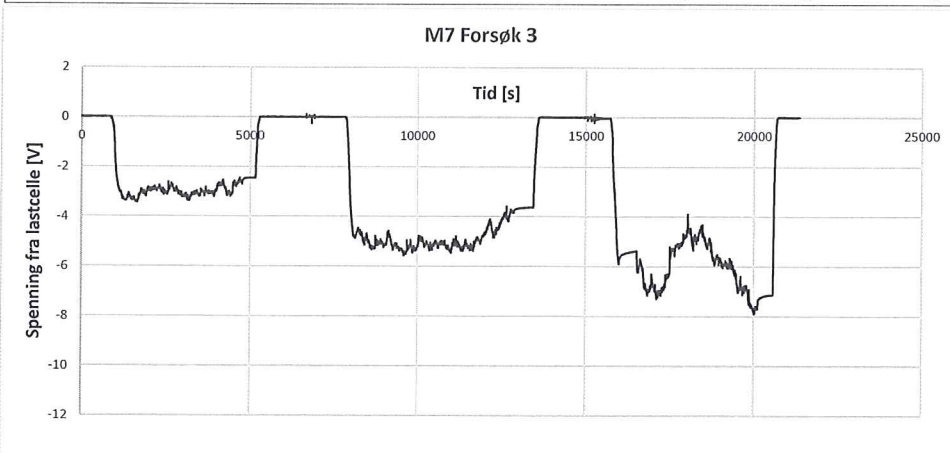
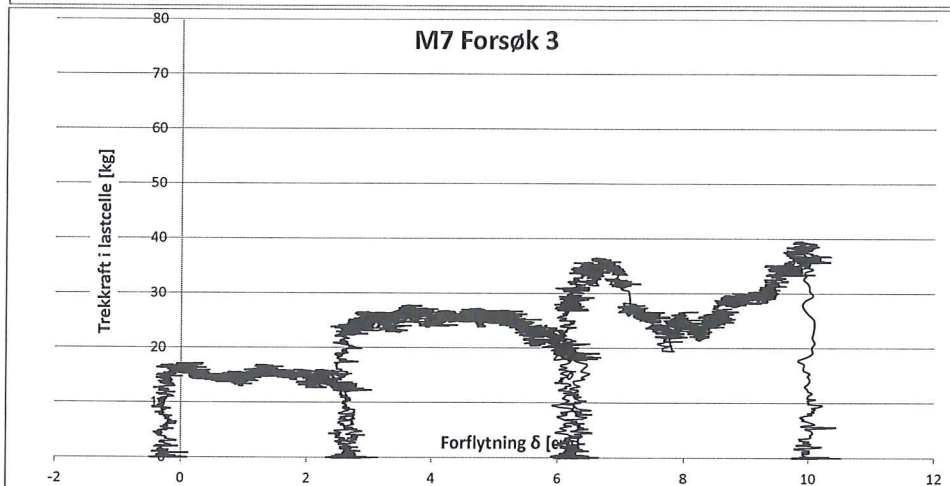
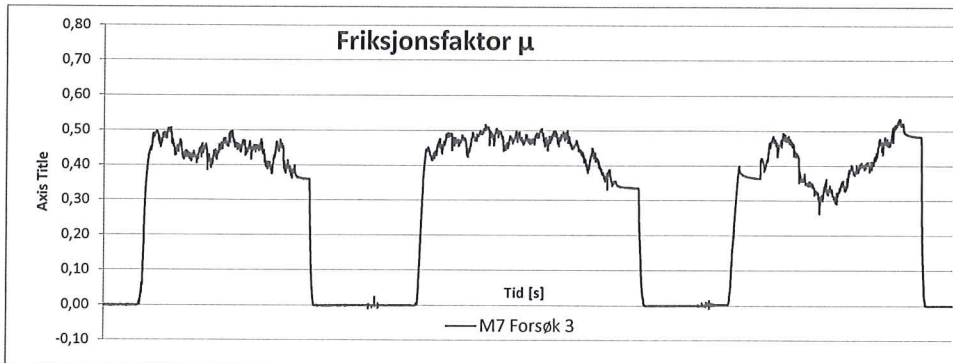
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting

Kassa hever seg ikke bak og det ligger ikke igjen korn etter kassa. Hadde problemer med ujevnt underlag under plata for loddene. Derfor "konsolidert" to ganger

Materiale: M7 16-22 mm pukk Tverråne
Serie nr: 15 Forsøk nr 3

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite



0
Serie 3 grov pukk ca 16-22 avrunda korn moderat knust fra Tverråne Nesbyen 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP
Tørr 2,5 cm slaglengde
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting
Kassa hever seg ikke bak og det ligger ikke igjen korn etter kassa. Mulig det ble litt mye små korn i bunnen pga utlasting fra kassa uten å blande om før det ble tømmt tilbake

Materiale:

M3 0-60mm Nyelve

Serie nr

16

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite Forsøk

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =	0,2	V endring i spenning
A	Areal prøve	60000	mm ²
g	Gravitasjon	0,00981	m/s ²
ζ	faktor lengde	-10	cm/V
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81	kg
	Lodd	20,00	kg

Informasjon om forsøket:

Serie 1 omfyllingsmasser ca 0-60 fra Nesbyen (ikke Tverråne) sortert grus/morene 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP

Tørr 2,5 cm slaglengde, støver ikke

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting

Kassa hever seg ikke bak og det ligger lite korn igjen etter kassa. GRP røret ble dreid rundt slik at dette forsøket er

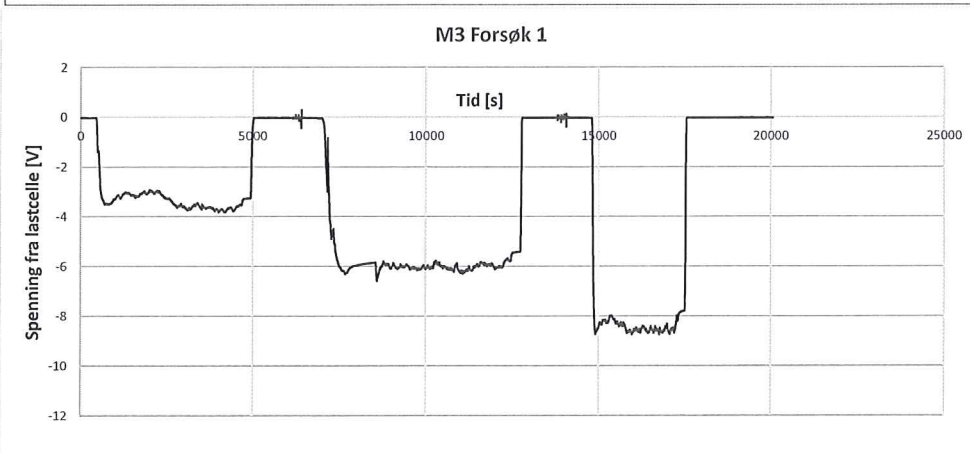
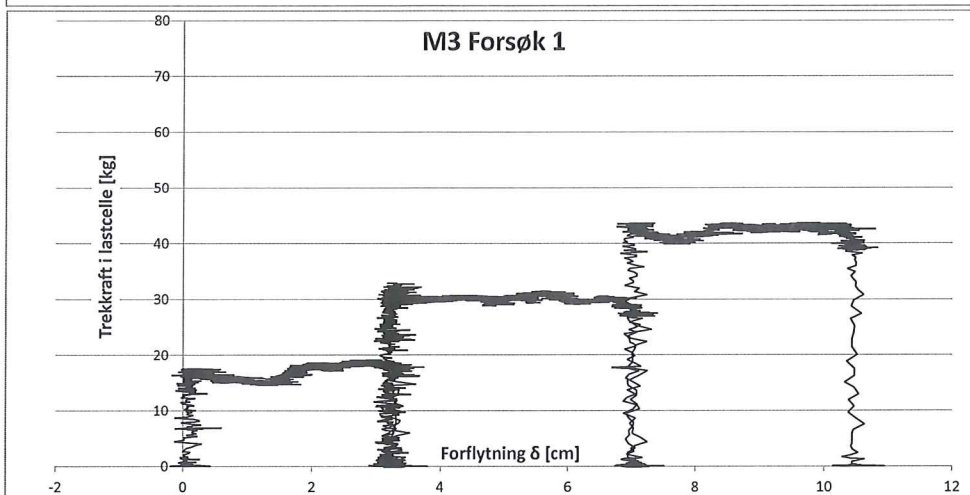
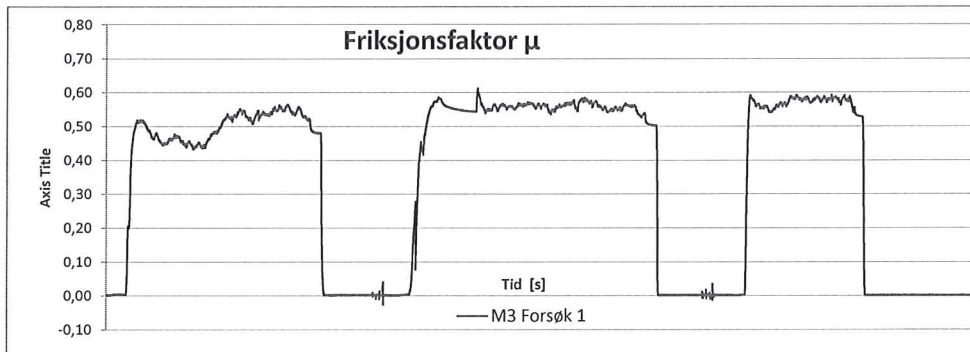
det første som kjøres på "ny overflate"

M3 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkraft	Skjærspenning	
Benevning	V _L [V]	V _A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]	
Formel			ΔV _A x ζ	V _L x λ		P / N	P x g	F / A	
0	-0,02593994	4,97695923		0	0,12969971	33,81	0,00	0,00127235	2,12059E-08
1	-0,01647949	4,97695923	0,16708375	0,08239746	33,81	0,00	0,00080832	1,3472E-08	
2	-0,02166748	4,96025085	-0,00457763	0,1083374	33,81	0,00	0,00106279	1,77132E-08	
3	-0,01464844	4,97741699	0,18386841	0,07324219	33,81	0,00	0,00071851	1,19751E-08	
4	-0,0088501	4,95857239	-0,00457763	0,04425049	33,81	0,00	0,0004341	7,23496E-09	
5	-0,02563477	4,97741699	-0,03433227	0,12817383	33,81	0,00	0,00125739	2,09564E-08	
6	-0,02075195	4,98039246	0,02441407	0,10375977	33,81	0,00	0,00101788	1,69647E-08	
7	-0,01922607	4,97451782	0,15411377	0,09613037	33,81	0,00	0,00094304	1,57173E-08	
8	-0,01586914	4,96154785	0,1449585	0,07934571	33,81	0,00	0,00077838	1,2973E-08	
9	-0,00915527	4,96246338	-0,0427246	0,04577637	33,81	0,00	0,00044907	7,48444E-09	
10	-0,02349854	4,98123169	0,1487732	0,11749268	33,81	0,00	0,0011526	1,92101E-08	
11	-0,02288818	4,96208191	0,12817383	0,11444092	33,81	0,00	0,00112267	1,87111E-08	
12	-0,01312256	4,96414185	0,02746583	0,0656128	33,81	0,00	0,00064366	1,07277E-08	
13	-0,0189209	4,97421265	0,11367798	0,09460449	33,81	0,00	0,00092807	1,54678E-08	
14	-0,01312256	4,96559143	0,14572144	0,0656128	33,81	0,00	0,00064366	1,07277E-08	
15	-0,02502441	4,96238709	-0,08087158	0,12512207	33,81	0,00	0,00122745	2,04575E-08	
16	-0,01922607	4,98504639	0,1777649	0,09613037	33,81	0,00	0,00094304	1,57173E-08	
17	-0,02166748	4,95918274	-0,06561279	0,1083374	33,81	0,00	0,00106279	1,77132E-08	
18	-0,01556397	4,98352051	0,23803711	0,07781983	33,81	0,00	0,00076341	1,27235E-08	
19	-0,00823975	4,95315552	0,07934571	0,04119873	33,81	0,00	0,00040416	6,73599E-09	
20	-0,02380371	4,96902466	0,15716553	0,11901856	33,81	0,00	0,00116757	1,94595E-08	
21	-0,01708984	4,96124268	0,02365113	0,08544922	33,81	0,00	0,00083826	1,39709E-08	
22	-0,02441406	4,97459412	0,15411377	0,12207032	33,81	0,00	0,00119751	1,99585E-08	
23	-0,02197266	4,96154785	0,07705689	0,10986328	33,81	0,00	0,00107776	1,79626E-08	
24	-0,01495361	4,96925354	0,05416871	0,07476807	33,81	0,00	0,00073347	1,22246E-08	
25	-0,01953125	4,97154236	0,37384034	0,09765625	33,81	0,00	0,00095801	1,59668E-08	
26	-0,00976563	4,9395752	0,05493165	0,04882813	33,81	0,00	0,000479	7,9834E-09	
27	-0,02075195	4,97146606	0,10299683	0,10375977	33,81	0,00	0,00101788	1,69647E-08	
28	-0,01586914	4,96665955	0,06713868	0,07934571	33,81	0,00	0,00077838	1,2973E-08	
29	-0,02685547	4,97024536	-0,04501342	0,13427735	33,81	0,00	0,00131726	2,19543E-08	
30	-0,01983643	4,98146057	-0,00762939	0,09918213	33,81	0,00	0,00097298	1,62163E-08	
31	-0,01739502	4,97772217	0,00076294	0,0869751	33,81	0,00	0,00085323	1,42204E-08	
32	-0,01464844	4,97688294	0,18463135	0,07324219	33,81	0,00	0,00071851	1,19751E-08	
33	-0,0076294	4,95849609	0,02746583	0,03814698	33,81	0,00	0,00037422	6,23703E-09	
34	-0,02349854	4,97421265	0,15716553	0,11749268	33,81	0,00	0,0011526	1,92101E-08	
35	-0,01556397	4,96124268	0,02136231	0,07781983	33,81	0,00	0,00076341	1,27235E-08	
36	-0,02502441	4,974823	0,00991822	0,12512207	33,81	0,00	0,00122745	2,04575E-08	
37	-0,02349854	4,97596741	0,42572022	0,11749268	33,81	0,00	0,0011526	1,92101E-08	

Materiale: M3 0-60mm Nyelve
Serie nr: 16 Forsøk nr 1

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite

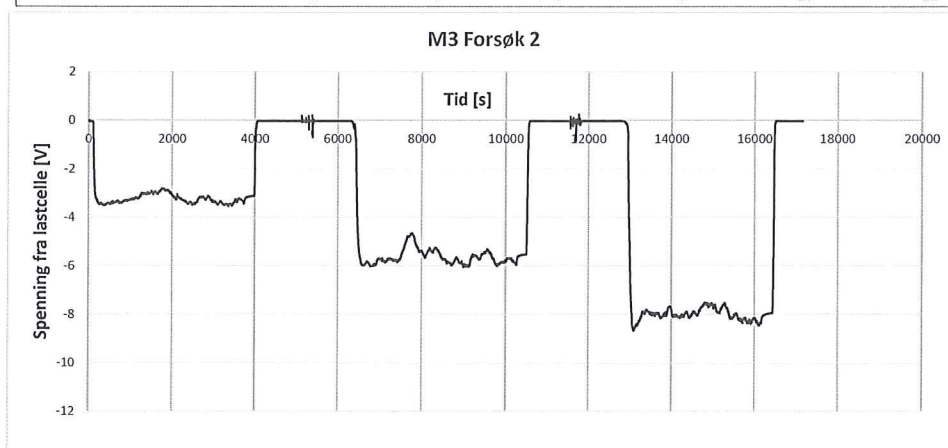
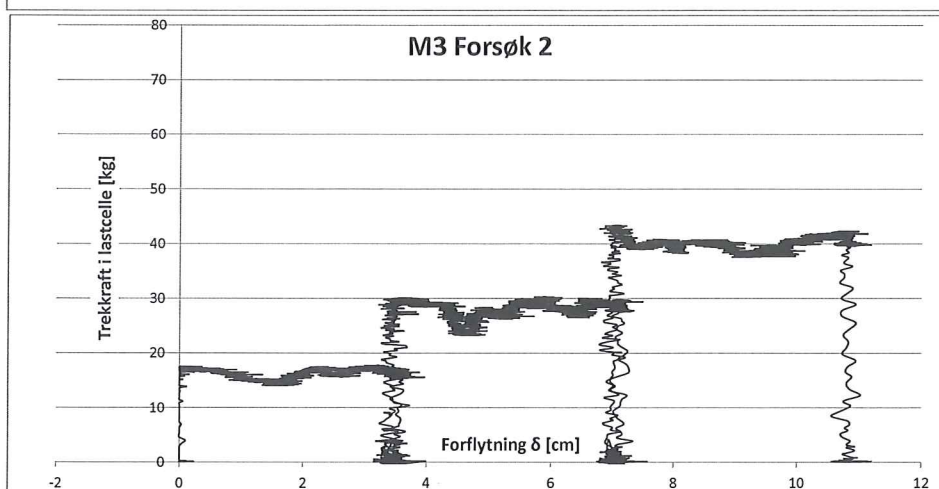
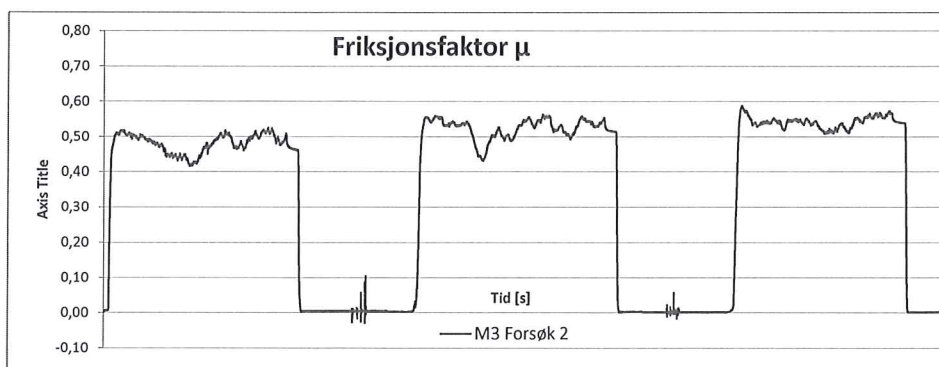


0

Serie 1 omfyllingsmasser ca 0-60 fra Nesbyen (ikke Tverråne) sortert grus/morene 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP
Tørr 2,5 cm slaglengde, støver ikke
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting
Kassa hever seg ikke bak og det ligger lite korn igjen etter kassa. GRP røret ble dreid rundt slik at dette forsøket er det første som kjøres på "ny overflate"

Materiale: M3 0-60mm Nyelve
Serie nr: 16 Forsøk nr 2

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite

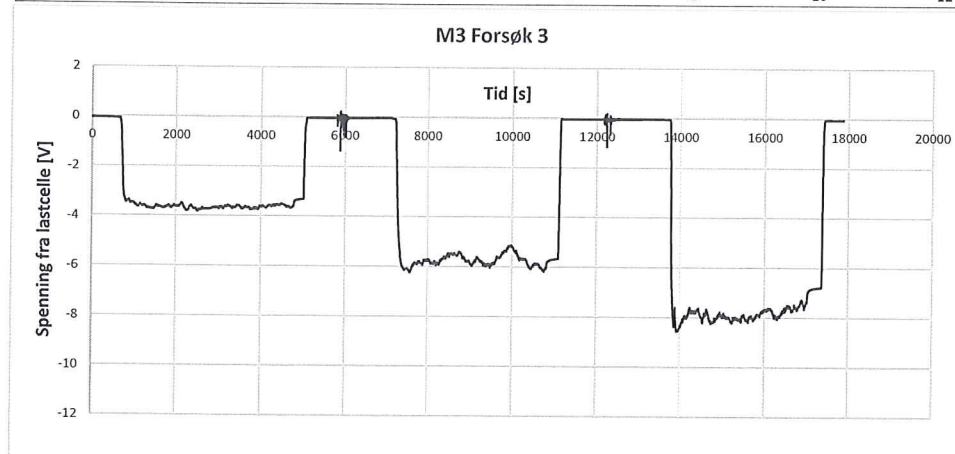
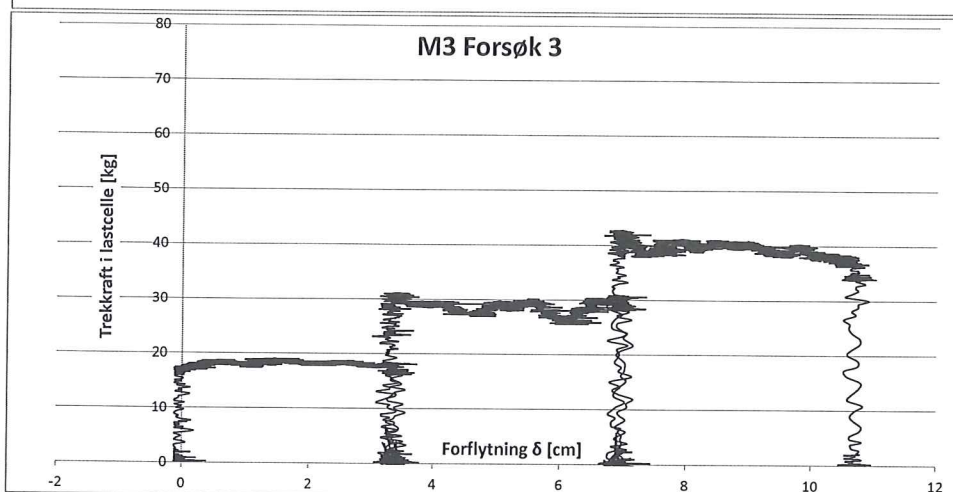
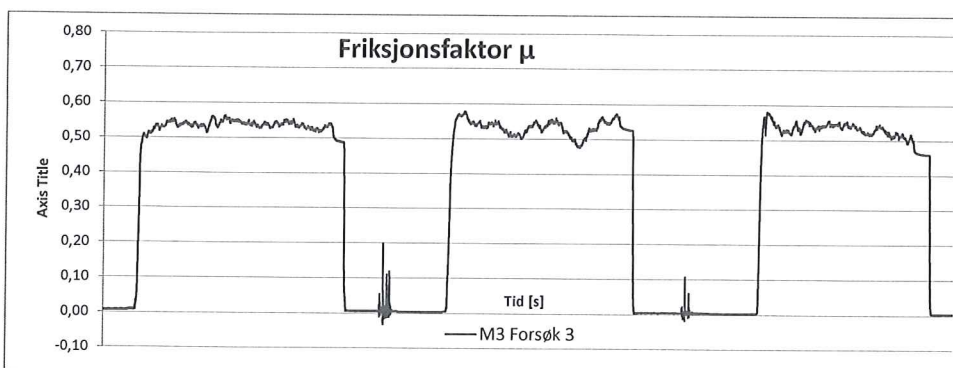


0

Serie 2 omfyllingsmasser ca 0-60 fra Nesbyen (ikke Tverråne) kjøpt sortert grus/morene 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP
Tørr 2,5 cm slaglengde, støver ikke
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøve igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting
Kassa hever seg ikke bak og det ligger lite korn igjen etter kassa.
GRP røret ble dreid rundt slik at dette forsøket er det første som kjøres på "ny overflate"

Materiale: M3 0-60mm Nyelve
Serie nr: 16 Forsøk nr 3

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite



0
Serie 3 omfyllingsmasser ca 0-60 fra Nesbyen (ikke Tverråne) kjøpt sortert grus/morene 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP
Tørr 2,5 cm slaglengde, støver ikke
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting
Kassa hever seg ikke bak og det ligger lite korn igjen etter kassa.
utlasting fra kassa uten å blande om før det ble tømt tilbake

Materiale:

M1 stedlig masse Tverråne

Serie nr 17

Rør: Ø500 m, PNG, GRP, Flowtite Forsøk

Inndata

Benevning	Beskrivelse	Verdi	Benevning
λ	1 kg =	0,2	V endring i spenning
A	Areal prøve	60000	mm ²
g	Gravitasjon	0,00981	m/s ²
ζ	faktor lengde	-10	cm/V
N	Vekt av prøve	4800 g + 4800 g + kasse 3960 g + plate 518 g + 20 kg lodd	
	Sum	13,81	kg
	Lodd	20,00	kg

Informasjon om forsøket:

Serie 1 stedlig morene Tverråne Nesbyen fra grøftekant 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP

Tørr 2,5 cm slaglengde, støver ikke, jordfuktig

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting

Kassa hever seg ikke bak og det ligger lite korn igjen etter kassa.

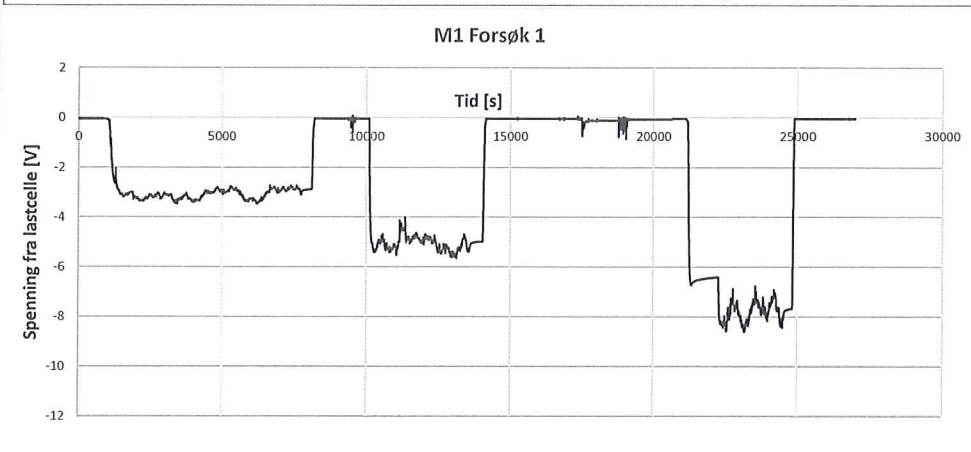
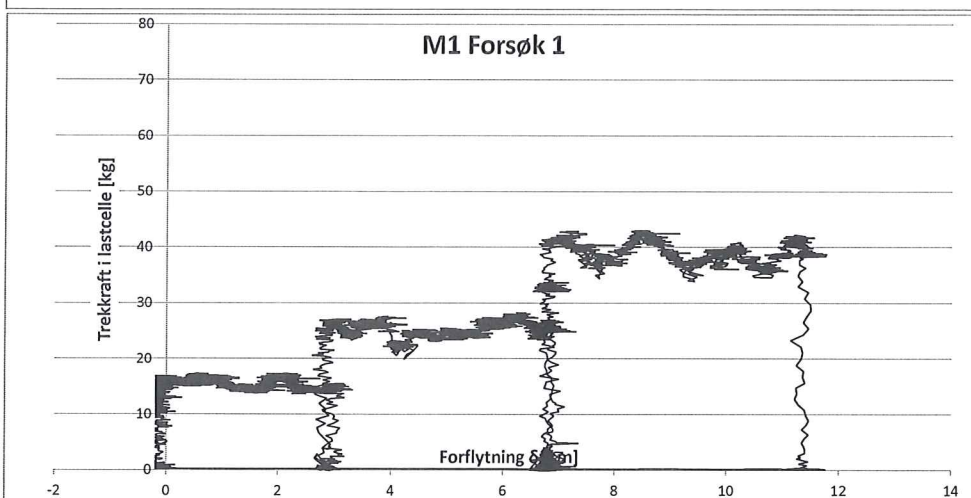
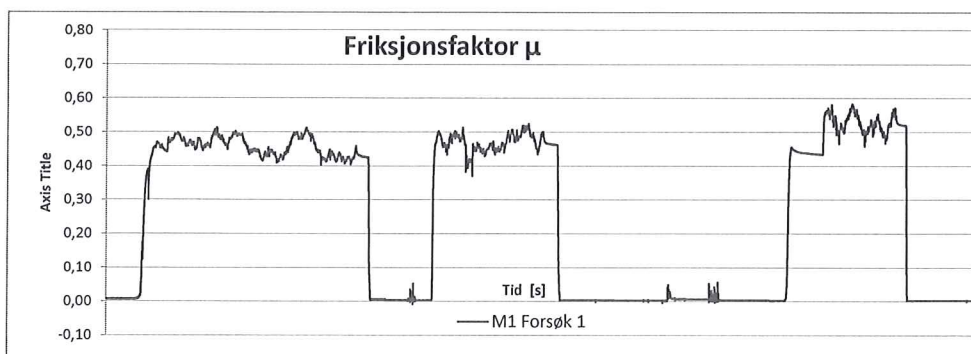
GRP røret ble dreid rundt slik at dette forsøket er nr 2 som kjøres på "ny overflate"

M1 Forsøk 1

Type	Lastcelle	Avstandsmåle	Forflytning	Trekkraft	Vekt jord	Friksjonsfakto	Trekkraft	Skjærspenning
Benevning	V _L [V]	V _A [V]	δ [cm]	P [kg]	N [kg]	μ	F [kN]	τ [N/mm ²]
Formel			ΔV _A × ζ	V _L × λ		P / N	P × g	F / A
0	-0,06164551	4,98100281	-0,15563964	0,30822754	33,81	0,01	0,00302371	5,03952E-08
1	-0,05859375	4,99656677	0,00228882	0,29296875	33,81	0,01	0,00287402	4,79004E-08
2	-0,05737305	4,98077393	-0,10299682	0,28686524	33,81	0,01	0,00281415	4,69025E-08
3	-0,05584717	4,99130249	-0,17700195	0,27923584	33,81	0,01	0,0027393	4,56551E-08
4	-0,05004883	4,998703	-0,11138916	0,25024414	33,81	0,01	0,0024549	4,09149E-08
5	-0,04760742	4,99214172	-0,18844604	0,23803711	33,81	0,01	0,00233514	3,89191E-08
6	-0,05584717	4,99984741	-0,18920898	0,27923584	33,81	0,01	0,0027393	4,56551E-08
7	-0,05584717	4,99992371	-0,18920898	0,27923584	33,81	0,01	0,0027393	4,56551E-08
8	-0,05279541	4,99992371	-0,12588501	0,26397705	33,81	0,01	0,00258961	4,31602E-08
9	-0,05065918	4,99359131	-0,10147094	0,2532959	33,81	0,01	0,00248483	4,14139E-08
10	-0,04699707	4,9911499	-0,01907348	0,23498535	33,81	0,01	0,00230521	3,84201E-08
11	-0,04486084	4,98291016	-0,07400512	0,2243042	33,81	0,01	0,00220042	3,66737E-08
12	-0,04699707	4,98840332	-0,09002685	0,23498535	33,81	0,01	0,00230521	3,84201E-08
13	-0,05615234	4,99000549	-0,06179809	0,28076172	33,81	0,01	0,00275427	4,59045E-08
14	-0,05828857	4,98718262	-0,18920898	0,29144287	33,81	0,01	0,00285905	4,76509E-08
15	-0,06072998	4,99992371	-0,18920898	0,3036499	33,81	0,01	0,00297881	4,96468E-08
16	-0,06103516	4,99992371	-0,14190673	0,30517578	33,81	0,01	0,00299377	4,98962E-08
17	-0,05493164	4,99519348	-0,17623901	0,27465821	33,81	0,01	0,0026944	4,49066E-08
18	-0,05065918	4,99862671	-0,18920898	0,2532959	33,81	0,01	0,00248483	4,14139E-08
19	-0,05249023	4,99992371	-0,12588501	0,26245117	33,81	0,01	0,00257465	4,29108E-08
20	-0,05615234	4,99359131	-0,18920898	0,28076172	33,81	0,01	0,00275427	4,59045E-08
21	-0,05737305	4,99992371	-0,18920898	0,28686524	33,81	0,01	0,00281415	4,69025E-08
22	-0,05401611	4,99992371	-0,18920898	0,27008057	33,81	0,01	0,00264949	4,41582E-08
23	-0,05279541	4,99992371	-0,18920898	0,26397705	33,81	0,01	0,00258961	4,31602E-08
24	-0,05279541	4,99992371	-0,15411377	0,26397705	33,81	0,01	0,00258961	4,31602E-08
25	-0,0491333	4,99641419	0,01602173	0,24566651	33,81	0,01	0,00240999	4,01665E-08
26	-0,04638672	4,97940064	-0,02059936	0,2319336	33,81	0,01	0,00227527	3,79211E-08
27	-0,04638672	4,98306274	-0,04730224	0,2319336	33,81	0,01	0,00227527	3,79211E-08
28	-0,05187988	4,98573303	-0,06179809	0,25939942	33,81	0,01	0,00254471	4,24118E-08
29	-0,05737305	4,98718262	-0,18920898	0,28686524	33,81	0,01	0,00281415	4,69025E-08
30	-0,06164551	4,99992371	-0,15487671	0,30822754	33,81	0,01	0,00302371	5,03952E-08
31	-0,05950928	4,99649048	-0,1411438	0,29754639	33,81	0,01	0,00291893	4,86488E-08
32	-0,05371094	4,99511719	-0,18920898	0,26855469	33,81	0,01	0,00263452	4,39087E-08
33	-0,05523682	4,99992371	-0,12512207	0,27618408	33,81	0,01	0,00270937	4,51561E-08
34	-0,05157471	4,99351502	-0,18920898	0,25787354	33,81	0,01	0,00252974	4,21623E-08
35	-0,04699707	4,99992371	-0,17929077	0,23498535	33,81	0,01	0,00230521	3,84201E-08
36	-0,050354	4,99893189	-0,09307861	0,25177002	33,81	0,01	0,00246986	4,11644E-08
37	-0,0491333	4,99031067	-0,18920898	0,24566651	33,81	0,01	0,00240999	4,01665E-08

Materiale: M1 stedlig masse Tverråne
Serie nr: 17 Forsøk nr 1

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite



0

Serie 1 stedlig morene Tverråne Nesbyen fra grøftekant 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP

Tørr 2,5 cm slaglengde, støver ikke, jordfuktig

20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde

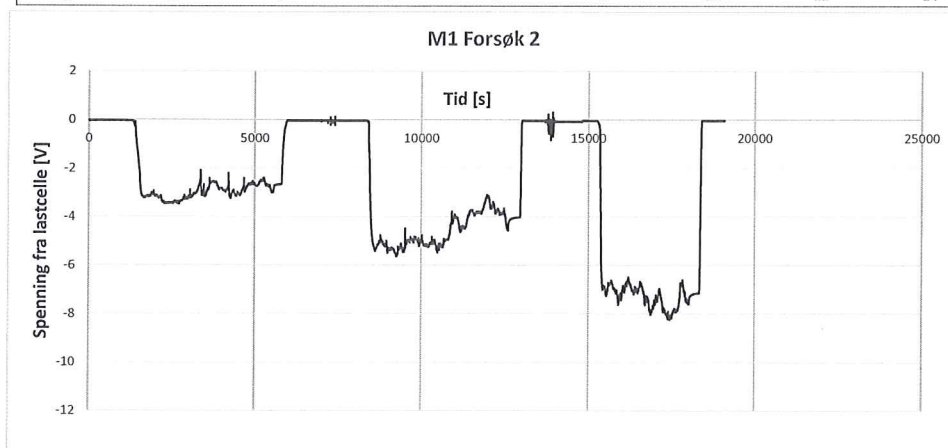
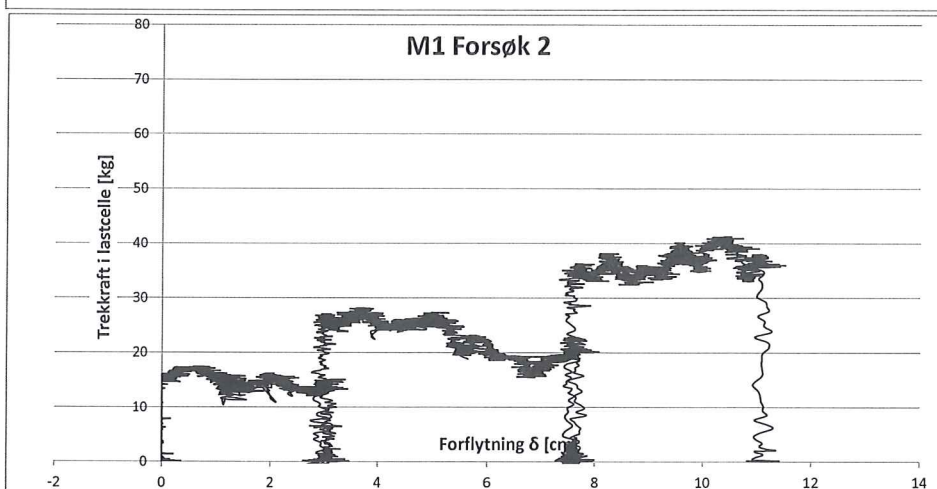
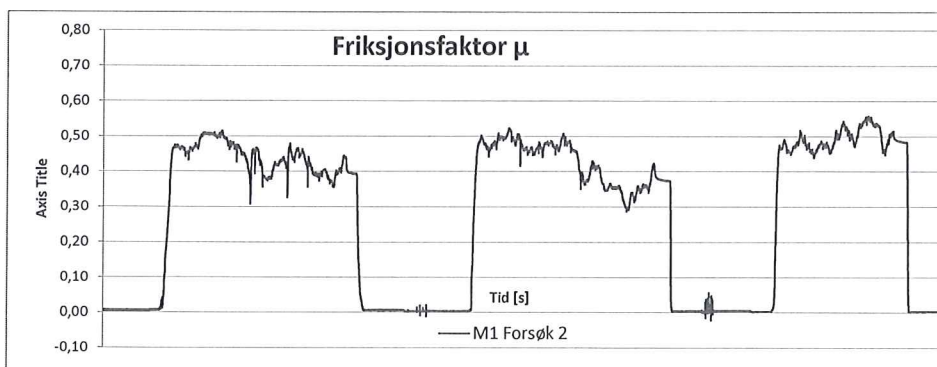
Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting

Kassa hever seg ikke bak og det ligger lite korn igjen etter kassa.

GRP røret ble dreid rundt slik at dette forsøket er nr 2 som kjøres på "ny overflate"

Materiale: M1 stedlig masse Tverråne
Serie nr: 17 Forsøk nr 2

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite

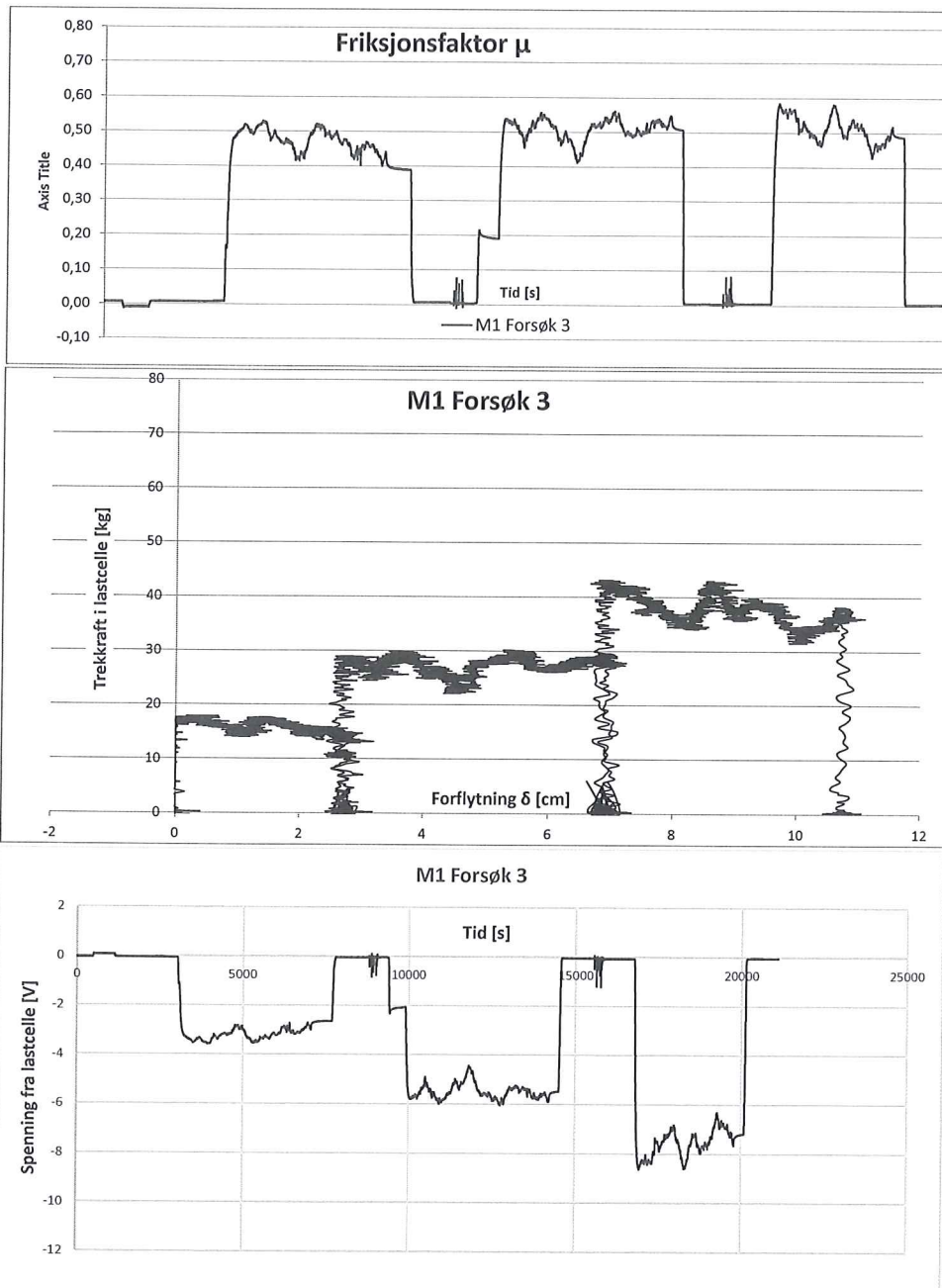


0

Serie 2 stedlig morene Tverråne Nesbyen fra grøftekant 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP minus 320 g stein som var tatt ut
Tørr 2,5 cm slaglengde, støver ikke, jordfuktig
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting
Kassa hever seg ikke bak og det ligger lite korn igjen etter kassa.
GRP røret ble dreid rundt slik at dette forsøket er nr 2 som kjøres på "ny overflate"

Materiale: M1 stedlig masse Tverråne
Serie nr: 17 Forsøk nr 3

Rør: Ø500 m, PN6, GRP, Flowtite



0
Serie 3 stedlig morene Tverråne Nesbyen fra grøftekant 9600 g prøve + plate + lodd + kasse mot GRP
Tørr 2,5 cm slaglengde, støver ikke, jordfuktig
20 kg lodd bankes på 4 ganger for hvert lodd som settes på for å konsolidere prøva igjen etter hvert deltrekk. Slippes fra ca 1-2 cm høyde
Kjører fast fart på sylinder på hver pålasting
Kassa hever seg ikke bak og det ligger lite korn igjen etter kassa.
utlasting fra kassa uten å blande om før det ble tømt tilbake

Vedlegg 3 Oversikt over rørbrudd 2009-2014

Vedlegg 3 oversikt over rørbrudd 2009-2014

I prosjektoppgaven til Svalesen (2015) er det samlet data om årsak til de rørbrudd NVE har registrert mellom 2009 og 2014. Disse har relevans for denne rapporten for å vise hva som har gått galt de siste årene og dermed forstå hva som bør legges vekt på i det videre arbeidet med å utvikle metoder for bygging av rørgater. Her følger utdrag fra prosjektoppgaven:

4 Kartlegging av rørbrudd

I perioden 2009 til 2014 har NVE registrert 24 hendelser i Norge der rørgater har gått til brudd eller har fått påført skader som har gitt fare for alvorlig funksjonssvikt. For å se om det er noen systematisk sammenheng mellom de skadene som oppstår er flere av tilfellene studert nærmere i dette kapitlet. Hendelser før 2009 er bare sporadisk registrert ettersom det ikke var krav om rapportering til NVE.

4.1 NVEs krav om innsending av melding ved ulykke eller uønsket hendelse

Innsending av melding om ulykke eller uønsket hendelse ved vassdragsanlegg er et krav som kom i forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg i 2010 (Damsikkerhetsforskriften). Formålet med bestemmelsen er å bidra til at erfaringer fra ulykker og uønskede hendelser kan samles inn, analyseres og brukes til å forebygge at tilsvarende hendelser skjer på nytt.

Kravet er hjemla i §7-11 og lyder slik:

Dersom det oppstår ulykke eller uønsket hendelse ved et vassdragsanlegg skal den ansvarlige snarest melde fra om dette til NVE, og skal innen tre måneder redegjøre for hva som har skjedd og hvordan ulykken eller hendelsen er håndtert. For anlegg i konsekvensklasse 0 gjelder meldeplikten bare ved ulykker. Med ulykke menes en uønsket eller en utilsiktet, plutselig situasjon som har skadelige følger. Med uønsket hendelse menes enhver annen uønsket situasjon enn ulykke som har sammenheng med vassdragsanlegget og som innvirker eller vil kunne innvirke på sikkerheten, herunder nestenulykker

Eksempler på ulykker kan være

- dødsfall/personskade ved vassdragsanlegg, med unntak av skade/uhell på egne ansatte
- dambrudd/rørbrudd
- brudd på konstruksjoner i vannvei (tverrslagsport mv.)
- stor skade på vassdragsanlegg (forårsaket av skred, flom, jøkulhlaup, erosjon, deformasjon, lekkasje, overtopping, svikt i fundament osv.)

Eksempler på uønskede hendelser kan være:

- Hendelser som har eller ville hatt stort skadepotensial på mennesker, miljø, vassdragsanlegget eller eiendom, men som forløp uten at skade ble påført. Eksempelvis ras inn i magasin eller jøkulhlaup (plutselig flom fra isbredemt vann) der det ikke oppstod skade fordi vannstanden i magasinet var lav.
- Overtopping av dam som ikke skader dammen, mennesker, miljø eller eiendom
- Nestenulykker på personer som oppholder seg på/ved vassdragsanlegg
- Unormal utvikling av lekkasjer, deformasjoner mv.
- Feil/svikt i manøvrering av luke/tappearrangement inklusiv styringssystem

I etterkant er det også presisert at uønskede hendelser som innbrudd i dam eller lukehus, skadeverk på anlegg og utstyr, påfallende atferd på og rundt anlegg osv, anses å være omfattet av bestemmelsen og skal rapporteres.

Rapportering til NVE

Ulykker og uønskede hendelser som kan utvikle seg til ulykker, skal umiddelbart rapporteres inn til NVE på telefon. Den umiddelbare rapporten skal inneholde en del basisinformasjon slik at NVE kan vurdere om det er behov for umiddelbar oppfølging. Den må si noe om hva som har skjedd, hvor det har skjedd, en angivelse av hvordan ulykken/hendelsen håndteres og en plan for videre oppfølging av ulykken/hendelsen.

I ettertid skal det utarbeides en redegjørelse som sendes inn. Denne bør utarbeides av en person NVE har godkjent, for å sikre kvalifisert kompetanse og nøytralitet. Redegjørelsen for både ulykker og uønskede hendelser må si noe om hva som skjedde, årsaken så langt det er mulig å fastslå og hvordan ulykken eller den uønskede hendelsen er håndtert. Omfanget vil normalt være avhengig av ulykkens/hendelsens alvorlighetsgrad og anleggets konsekvensklasse (NVE, 2014). Dette arbeidet bør involvere prosjekterende, utførende og leverandøren for å få deres syn på hva som er årsak.

I en del tilfeller kan sviktårsaken synes uklar. Hartmann (2012) angir da at redegjørelsen bør inneholde

- Vurdering av tekniske planer, kontrollplaner, utstyrsbestillinger, utstyrssertifikater/spesifikasjoner, kontrollrapporter og utfylte kontrollskjema mot hverandre, mot faktiske anleggsforhold og mot myndighetskrav
- Inspeksjon av skade: skadeutseendets indikasjon av mulig(e) skadeårsak(er) og analyser og evt. prøver for nærmere å kunne verifisere årsaken.
- Ved rør/rørdelprøving hos leverandøren blir redegjørers faglige objektivitet av betydning. Det bør også vurderes behov for uavhengig prøving av materialet.

4.2 Oversikt over rørbrudd

De innsendte rapportene danner basis for NVEs database over kjente rørbrudd fra 2009 og fram til i dag. Det er registrert til sammen 24 rørbrudd. To av disse, Suldal I og Nunelva, er over 50 år gamle stålrør og sees bort fra i det videre. Tabell 2 under viser en oversikt:

Nr	Vannvei navn	Konsekvens-klasse	Material-type	Hendelse type	År	Kommentar
4.3.0	SULDAL I	2	Stål - innstøpt	Rørbrudd	2009	50 år gammelt anlegg
4.3.1	SÆGROV KRAFTVERK	?	GRP	Rørbrudd	2009	Jordmasser oppå fritt opplagt rørgate har ført til skjærbrudd i rørmaterialet pga vekt
4.3.2	FALL KRAFTVERK RØRGATE	2	GRP	Rørbrudd	2009	Flere uavhengige feil i dimensjonering og bygging av forankringskloss.
4.3.3	HJELLEDØLA	2	GRP	Totalt brudd	2009	Rørbrudd pga lekkasje/skadet pakning
4.3.4	GÅSVASSELVA TRYKKRØR	1	GRP	Totalt brudd	2009	Uklar bruddårsak, høy andel finstoff i omfylling av stedlige masser
4.3.5	FINNESETBEKKEN KRAFTVERK TRYKKRØR	1	Duktilt	Skade på anlegg	2010	Skader på røret pga feil legging og utilstrekkelig uavhengig stedlig kontroll under bygging
4.3.6	MOSBAKKA KRAFTVERK TRYKKRØR	2	GRP	Rørbrudd	2010	Skade på rør pga punktlast (stor stein i fundamentet)
4.3.7	INDRE JÅSTAD TRYKKRØR	2	Duktilt	Rørbrudd	2010	Feil ved inntrenging av rørspliss i muffe ødela pakning. Stein og grus eroderte hull i støpejernet.
4.3.8	GJESDAL KRAFTVERK VANNVEI	2	GRP	Rørbrudd	2010	Utvasking av omfyllingsmasser og skader på rør pga bekk som kom ut av kontroll under bygging.

4.3.9	GÅSVASSELVA TRYKKRØR	1	GRP	Totalt brudd	2011	Uklar bruddårsak, dårlige omfyllingsmasser, men og tegn på produksjonsfeil på rørseksjon
4.3.10	FØSSA KRAFTVERK TRYKKRØR	2	GRP	Delvis brudd	2011	Materialfeil. Lekkasje har oppstått i muffe som vaska ut omfylling.
4.3.11	URDSDALSELVA TRYKKRØR	2	GRP	Rørbrudd	2011	Brudd like nedstrøms inntaket (ca 20 m trykkhøyde?) i fm første gangs fylling, des. 2011.
4.3.12	LILLE HYLLA TRYKKRØR	2	GRP	Rørbrudd	2011	Rørbrudd pga setning i fundament inn mot forankringskloss
4.3.13	ÅSGARD TRYKKRØR	1	GRP	Rørbrudd	2011	Totalt 14 kjente bruddhendelser ved anlegget i årene 2006-2011.
4.3.14	KANNDALEN KRAFTVERK TRYKKRØR	1	Duktilt	Rørbrudd	2012	Brudd på duktile støpejernsrør Ø1000mm v/kraftstasjon (263mVs). Bruddårsak sannsynligvis utvasking av stabiliserende masser rundt røret ifm. store nedbørmengder.
4.3.15	RAMSTADDAL TRYKKRØR	1	Duktilt	Rørbrudd	2012	Stor vannføring over overløp kombinert med opphoping av snø gav bølge av vann/snø og etterhvert jord som skada kryssing av elv
4.3.16	FORSLAND KRAFTVERK TILLØP	1	GRP	Rørbrudd	2012	Brudd på HOBAS-rør, 4 rørseksjoner i rørtunnelen fra betongproppen og videre retning kraftstasjon ødelagt. Tverrslagsport ødelagt, og adkomstvei til stasjon vasket bort.
4.3.17	FØSSA KRAFTVERK TRYKKRØR	2	GRP	Delvis brudd	2012	Brudd nr 2 og 3 på samme trykk-klasse (PN 32). HOBAS-rør, feil i muffe
4.3.18	FØSSA KRAFTVERK TRYKKRØR	2	GRP	Delvis brudd	2012	Rørbrudd nr 4 på trykk-klasse PN25 (HOBAS), feil i muffe
4.3.19	NAURAK TRYKKRØR	Ikke klassifisert	Ukjent	Rørbrudd	2012	To tidligere brudd (2005 og 2008), Trolig pga stor stein som lå inntil røret. Ved videoinspeksjon 2008 ble mistenkelig punkt funnet på samme sted som bruddet i 2012
4.3.20	TVERRÅGA KRADTVERK TRYKKRØR	2	Duktilt Støpejern. T-kobling	Rørbrudd	2014	For liten overdekning/fastholdelse av kort tilpassningsrør (kun 2,8 m) i forhold til avvinkling etter kryssing av elv
4.3.21	BIRKÅAS KRAFTVRK TILLØPSRØR	1	GRP Ø500mm	Rørbrudd	2014	Sprekk ved overgangskobling mellom GRP- og GJS-rør, 13 år gammelt anlegg
4.3.22	NUNELVA RØRGATE	0	Stålrør	Rørbrudd	2014	Sprekk, 60 år gammelt anlegg
4.3.23	JEKTVIG	0	GRP	Rørbrudd	2014	Trykkstøt, 10 år gammelt anlegg, NVE har ikke mer info enn dette.

Tabell 1: Oversikt over rørbrudd 2009-2014 (kilde:NVE)

4.3 Nærmere informasjon om 16 utvalgte rørbrudd

Nedenfor følger utfyllende informasjon om 16 av de 24 bruddtilfellene. Beskrivelsene er basert på en oversikt utarbeida av Ragnar Hartmann i 2012 og innsendte rapporter og dokumentasjon til NVE. I hver beskrivelse konkluderes det til slutt med en sannsynlig bruddårsak. Dette er forfatterens egen vurdering av primær og evt. sekundær årsak til at hendelsen oppstod basert på den tilgjengelige informasjonen.

4.3.1 Sægrov kraftverk

HOBAS DN 500 GRP rør. Brudd oppstod våren 2009. Kilde: Hartmann (2012)



Figur 1: Brudd ved Sægrov kraftverk våren 2009. Kilde: Hartman (2012)

Sannsynlig bruddårsak: kombinasjonen fritt opplagt rør og overfylling av masser gir skjærkrefter røret ikke tåler

Figur 2: Brudd sett fra side. Legg merke til opplagringa på betongfundament OG omfylling/overfylling av jord. Kilde: Hartmann (2012)



4.3.3 Fall kraftverk

Frittliggende GRP-rør DN 1200/PN 6-32, kilde: Hartmann (2012)



Figur 3: Forskjøvet forankringskloss. Røde linjer indikerer forskyvninga av klossen.

fjellforankring. Sidemannskontrollen avdekket det ikke fordi tegning og beregning ble kontrollert uavhengig av hverandre. Beregningsfeilen ble derfor ikke oppdaga.

Når så entreprenøren skulle grave ut fundamentet for forankringsklossen var han redd for å undergrave fundamentet på huset ved siden av og klossen ble derfor bygd grunnere. Dette ble ikke tatt opp med byggherre eller prosjekterende og kontrollen underveis avdekket heller ikke at det var avvik mellom tegning og utførelse.

Sannsynlig bruddårsak: mangelfull dimensjonering OG mangelfull kontroll at utførelse.

4.3.5 Finnesetbekken Kraftverk

Nedgravd rørgate i duktilt støpejern, kilde: Hartmann (2012)



Figur 4: Rørgate ved Finnesetbekken kraftverk. Legg merke til mangelfullt rørfundament og trebit under muffa. Kilde: Kolbjørn Dønåsen AS/Ragnar Hartmann

Dette kraftverket har ikke vært konsesjonsbehandla av NVE, men tekniske planer ble utarbeida av Multiconsult. Røra ble installert i 2009 og er duktile støpejernsrør. Ved førstegangs oppfylling i mai 2010 ble det oppdaga lekkasjer. Innvendig rørkontroll med kamera ble utført og denne avdekket flere rørveggskader. Alle skadene lå i bunnen av rørtverrsnittet og bestod av innbulinger, sprekker i rørvegg og avskala betongbelegg. På ett punkt var det og observert noe som ble beskrevet som «ståltråd». Dette tolkes som avrevet duktilt støpejern. Ved en rørskjøt var det innlekkasje av vann.

En rapport om skadene angir feil rørliggerprosedyrer og utilstrekkelig uavhengig stedlig kontroll som sviktårsak. Figur 28 viser avdekking av et punkt på rørgata som viser rørgata lagt på et utilfredsstillende fundament. Det skal ha vært mange treklosser under rørgata som ikke var fjerna før røra ble fylt ned. Rørleverandøren Brødrene Dahl og produsenten Saint Gobain opplyser at skadeutseende er typisk for skader som oppstår som følge av installasjonsfeil og utvendig lokal last. Hartmann (2012) påpeker at ved kartlegging av skadeårsak er det:

1. Ikke utført beregninger som kunne bidra til ytterligere sansynliggjøring av angitt bruddårsak
2. Ikke gjennomgått materialsertifikater
3. Ikke utført kontrolloppmåling av rørveggtykkelse

Sannsynlig bruddårsak: feil i utførelse av rørlagging og manglende kontroll av utførelse på byggeplass.

4.3.6 Mosbakka kraftverk

DN 500 GRP levert av Flowtite, kilde: Hartmann (2012)
Problemene ved Mosbakka er todelt. Bruddet i 2010 kom fra en stein som stakk opp i fundamentet under røret. Figur 29 viser stillbilde fra videoinspeksjonen av røret. NVE stiller krav om minst 200 mm tykkelse på nedre fundament i løsmassegrøft uten steiner eller oppstikkende fjellknauser. Dette var ikke tilfredsstillt her.



Figur 6: Bruk av omfyllingskasse, eksempelbilde. Kilde: Ragnar Hartmann



Figur 5: Mosbakka kraftverk, stillbilde fra kamerainspeksjon. Kilde: Ragnar Hartmann

Hartmann (2012) viser også til at det ble brukt innfyllingskasse under installasjon og nedfylling av rørgata. (fig 30) Der innfyllingskasse ble brukt viste det seg at det var langt flere rørveggskader enn ellers. Disse skadene oppstår fordi innfyllingskassa vanskeliggjør/umuliggjør tilfredsstillende komprimering av massene i rørsidene som igjen gir økt risiko for lokale lastkonsentrasjoner og setninger

rundt røret. Setningene kan føre til at steiner i omfyllingsmassen kommer nærmere røret enn de skal.

Sannsynlig bruddårsak: Stein i fundamentet skyldes slurv fra entreprenørens side og manglende kontroll fra byggherre. Problemene med bruk av omfyllingskasse kan tyde manglende kunnskap hos entreprenør og evt. byggherre om følgene ved bruk av omfyllingskasse. Det kan også tyde på manglende kyndig kontroll av utførelse fra byggherresida.

4.3.7 Indre Jåstad kraftverk

DN 500 rørgate i K9 duktile støpejernsrør. Kilde: Ragnar Hartmann (2012)

Første gang oppfylt i midten av mai 2010. Lekkasje ble påvist og bruddsted funnet 31. mai 2010. Trykk på stedet var ca 200 mVS. Skaden på røret har oppstått pga skade på en pakning. Pakningen ble klipt over da rørene ble tredd sammen. Vannet som strømmet ut fra rørskjøten lagde et hulrom der sand og stein virvle

rundt og eroderte etter et par dager hull i rørveggen.



Figur 7 Indre Jåstad kraftverk, vannstrømmen virvlet opp sand og steiner slik at det eroderte hull i rørveggen. Foto: Jåstadkraft

Sannsynlig bruddårsak: uhell/feil ved montasje

4.3.8 Gjesdal kraftverk

1100 meter Ø1200 mm GRP rørgate bygd 2010/2011.

Kilde: innsendte rapporter til NVE og telefonintervju med hovedaksjonær.



Figur 8 Utvaska fundament ved rør nr 63 – 66. Steinene som har raset ned bak det svarte drenerørret førte til synlige skader på rørvegg. Foto Gjesdal Kraftverk AS

Under bygginga av rørgata var en kryssende bekk på et strekk som ikke var nedfylt enda, lagt over traseene i en åpen, tillaga kanal. Mye nedbør førte til at bekken grov seg ut av kanalen og rant ned i rørgate-traseen. Allerede kvelden før skaden oppstod så personell på anlegget at vannføringa steg så mye at dette ville komme til å gå galt.

Traseen for rørgata var utsprengt i fjell og det førte til at vannet fulgte kanalen over et lengre strekk og vaska ut omfyllingsmassene som var lagt under og rundt røret fra rør nr 55 til ca rør nr 70. Utgravinga førte til at steiner i sidene av grøfta løsna og falt ned på rørgata og forårsaka punktskader. Rørfundamentet ble vaska bort på flere strekninger og førte til uakseptable setninger ved skjøtene. Utvasking av finstoff i omfyllingsmassene gjorde at rør måtte legges på nytt.

Rapporten fra skaden sier at et tiltak for å hindre dette i framtida er å etablere flere grøftesperrer. Det var ei grøftesperre ved rør nr 55 som fikk leda vatnet ut av grøfta og hindra skade på røra lengre ned. Den aktuelle bekken er nå lagt i rør over rørgata og området rundt bekkekryssinga er sikra med bruk av geotekstil for å hindre evt. framtidig utgraving av finkorna masser.

Sannsynlig bruddårsak: For dårlig utførelse på midlertidig omlegging av kryssende bekk



Figur 9 Slagskade fra stein som har falt ned etter utvasking av fundament og omfyllingsmasser rør nr 65. Foto Gjesdal Kraft AS

4.3.9 Gåsvasselva kraftverk

DN 700 GRP, satt i drift mars 2007. Kilde: Rapport til NVE fra Lifjellkraft AS/Norconsult



Figur 10 Brudd ved Gåsvasselva kraftverk, ukontrollert utstrømming av vann mot fylkesveien. Foto: Statkraft

Har hatt to brudd, ett i 2009 og ett i 2011. Bruddstedene ligger på hhv trykkehøyde 70 og 65 mVS. Bruddårsaken synes noe uklar ut fra det tilgjengelige materialet. Det pekes på at det ikke var langsgående drenering i grøfta. Stedlige masser var brukt til fundament og omfylling rundt røret der større steiner var sortert ut, men andelen finstoff var høy. Dvs ikke pukk i fundament. I forbindelse med utvaskinga og rørbruddet ligger det igjen større steiner enn det massebeskrivelsen fra bygginga tilsier.

Norconsult laga en rapport som sier «... Noen av rørene var også ovalisert, for det verste røret varierte diameteren fra 72 til 83 cm. (...) Den delvise inspeksjonen av røret innvendig viser mekaniske skader på røret, saksing i skjøter og stuking av røret i skjøter. Alle disse tingene kan føre til lekkasje og rørbrudd. Basert på det som ser ut som dårlig laminering og manglende polyester i det skadede røret kan det ikke utelukkes at selve røret er helt eller delvis skyld i bruddet.»

Rørgata var uten rørbruddsventil og hadde et bjelkestengsel som stengeorgan for inntaket. Rørbruddsvannføringa og den høye inntaksvannstanden umuliggjorde stenging av inntaket. Bunnluke ved inntaket ble åpnet for å forsøke å redusere vannføringa noe, men tilsiget var så stort at dette hadde liten effekt på vannføringa. Vannet fortsatte å strømme ukontrollert mot bruddstedet. Løsningen ble å grave opp rørgata nedstrøms inntaket for å lede vannet tilbake og ut i elveleiet.

Sannsynlig bruddårsak: Vanskelig å si. Det skadede røret har så mange skader at det er vanskelig å fastlegge årsak.

4.3.10 Føssa Kraftverk brudd nr 1

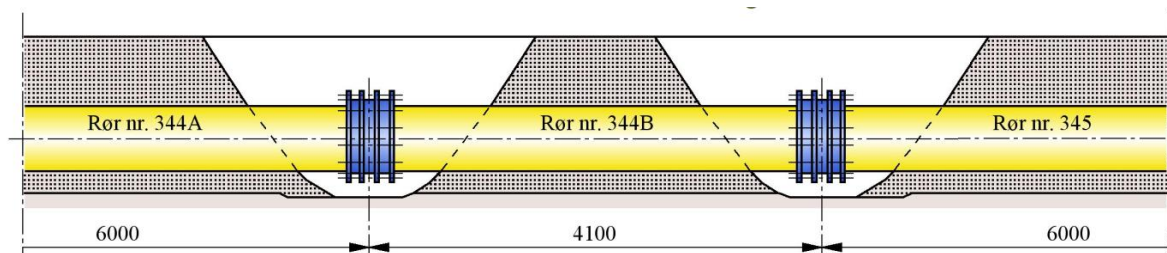
DN 600 GRP, kilde: Ragnar Hartmann (2012)/rørbruddsrapport sendt NVE fra Føssa Kraft AS.



Figur 12: Rørbrudd ved Føssa Kraftverk juni 2011. Foto Edvin Bakken

Føssa Kraftverk ble satt i drift mai 2011. Rørgata består hovedsakelig av DN 600 GRP rør fra HOBAS og noe støpejernsrør i nedre del. I løpet av de første 10 000 driftstimene fant det sted fire rørbrudd med vannutstrømning fra GRP-rør. Disse omtales lengre ned i teksten i pkt 4.3.17 og 4.3.18.

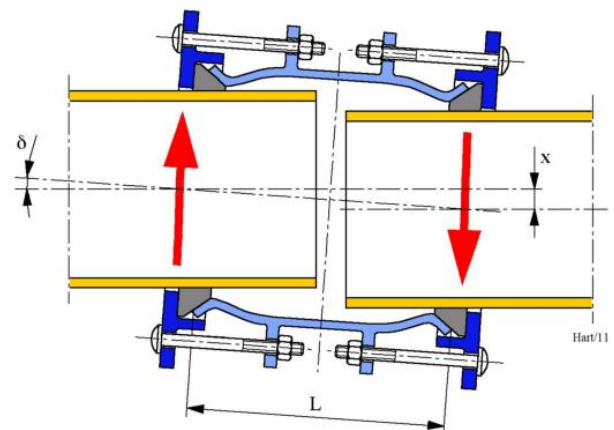
I juni 2011 oppstod det første rørbruddet der sakkyndig først konkluderte med at en stor stein i omfyllingsmassen trolig var årsak til skaden på røret. På bakgrunn av de seinere rørbruddene som har oppstått, er det i etterkant konkludert med at ei muffe var sviktårsak. Statisk trykk ved bruddstedet var 277 mVS Etter rørbruddet ble skaden reparert med nytt rør og stålkoblinger som vist i figur 36. Rørendene skulle ut fra oppmåling ha vertikal avvinkling i størrelsesorden 1,0 grader med konveks side vendt ned og horisontal avvinkling som var mindre enn 0,5 grader.



Figur 11: Prinsippskisse over reparasjon av rør ved Føssa Kraftverk med stålkoblinger. Kilde: Ragnar Hartmann (2012)

Reparasjonen ble utført og selve røret fylt ned, men stålkoblingene i rørskjøtene var forutsatt å ikke fylles ned før vanntrykket var påsatt slik at tettheten kunne kontrollers. Det var tenkt å gjøre en stabilitetskontroll på det delvis nedfylte erstatningsrøret før man tillot og fylle røret med vann. Denne stabilitetskontrollen fant ikke sted. Fyllinga av rørgata endte med at rørenden i en av koblingene knakk ut og det oppstod nytt brudd. Trykket ved bruddstedet var da ca 210 mVS

Vurdering i ettertid indikerer at det i tillegg til oppgitt røravvinkling, må ha vært en parallellforskyvning x mellom rørene. Denne gav en tilleggsavvinkling δ mellom rørender og kobling slik at et destabiliserende lastpar oppstod slik som vist i figur 37.



Figur 13: Prinsippskisse: parallell forskyvning x i kobling gir avvinkling δ . Kilde: Ragnar Hartmann (2012)

Sannsynlig bruddårsak: Primært materialsvik i muffe og sekundært for lite stabiliserende krefter i forhold til avvinklinga i kobling

4.3.12 Hylla kraftverk, Engerdal

Kilde: Ragnar Hartmann (2012)

Hylla kraftverk har hatt 3 rørbrudd, det siste i 2012. Anlegget har ei 1850 meter rørgate med DN 800 mm Vera GRP-rør lagt i 1986. 1. rørbrudd kom i 2001 da spenningskorrosjon i boltene på ei rørkobling medførte brudd. 2. rørbrudd kom i 2007. Primær bruddårsak var setning i rørfundamentet inn mot en forankringskloss. Det var benytta 12 meter lange rør inn mot klossen i trykklasser PN 16. Statisk trykk ved bruddsted var 154 mVS. Ved utbedring av skaden økte man trykklassen fra PN 16 til PN25.



Figur 15 Følgeskade 70 meter nedstrøms bruddstedet med utvasking av omfyllingsmassene. Foto: Eidsiva



Figur 14 Hylla Kraftverk, erosjon i rørmaterialet pga defekt pakning i rørkobling. Foto: Eidsiva

I 2011 oppstod det på nytt rørbrudd i overgangen til samme forankringskloss som i 2007. Skaden var ei spalte på 50-70 mm rundt røromkretsen. Hartmann (2012) angir at skaden oppstod pga koblingstetningsdefekt og dermed vannlekkasje som gav erosjonsskader på rørvegg med laminærbrudd og avskaling av en 250-300 mm bred og 2-3 mm tykk del av rørmaterialet. Dette gav en følgeskade ca 70 meter nedstrøms bruddstedet der vannet vasket bort massene rundt røret.

Sannsynlig bruddårsak: 1. brudd: korrosjon på bolter. 2. brudd: setning i rørfundament og at det ikke er brukt kortere, setningskompenserende rør inn mot fundamentklosser. 3. brudd: Erosjonsskader på rørvegg pga defekt pakning i rørkobling.

4.3.14 Kanndalen Kraftverk

Kilde: Rapport fra Kanndalen kraft til NVE

Kraftverket ble satt i drift januar 2012 og hadde ennå ikke hatt fullastproduksjon pga lav vannføring da bruddet oppstod. Den 12. mars 2012 skjedde det et rørbrudd like ovenfor kraftstasjonen. Ingen var til



Figur 16 Skadd rørstrekning Kanndalen kraftverk. Til venstre for bendkloss vises spor etter bekk som antas å ha medført erosjon/utvasking. Foto: Småkraft AS

stedet og kunne se hva som skjedde men man har angitt den mest sannsynlige årsaken. Rørbruddet skjedde i en skråning mellom to bend/forankringspunkt med maks helning på ca 33 grader. Strekingen mellom forankringspunktene er 60 meter og det er lagt DN 1000 K9 duktile støpejernsrør. Skråningen er en moreneskråning bestående av sand/grus/stein og grøfta er gravd i denne skråningen med tunellmasser som fundament. Røra hadde god overdekning.

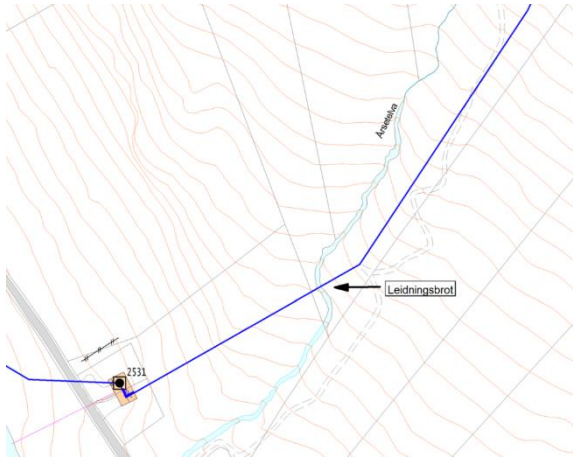
På skadetidspunktet var det sterk nedbør og høy temperatur som førte til at nedbør og snøsmelting til sammen gav høy overflateavrenning. Det antas at massene i skråningen på forhånd var vannmetta og så har det kommet en bekk fra terrenget oppstrøms for det øverste bendedet, som har begynt å erodere i de vannmetta massene i skråningen. Dette førte til at massene som skulle stabilisere røret ble vaska bort og rørene fikk forskyve seg tilstrekkelig til at de har knekt ut i en av skjøtemuffene. Aggregatet mista kommunikasjonen til dammen og stoppa som «nødstop». Trolig skyldes kommunikasjonssvikten rørbruddet/utgravinga. Nødstop på anlegget forårsaker et trykkstøt som antas å ha vært den direkte foranledningen til selve rørbruddet.

Luka i inntaket lot seg ikke stenge helt, trolig pga fremmedlegemer, så det fortsatte å strømme ut «en del vann» vann fra røret i fire eller fem dager til før inntaket ble helt stengt. Det er betydelige erosjonsskader nedstrøms bruddstedet og inntaket til Dokkaelva kraftstasjon som ligger like nedstrøms Kanndalen kraftstasjon, er fullstendig oppfylt med stein- og grusmasser.

Sannsynlig bruddårsak: utløsende faktor var kraftig regnvær og snøsmelting som eroderte bort omfyllingsmassene i en fersk (nygravd) skråning.

4.3.15 Ramstaddal kraftverk

Kilde: Rapport sendt NVE fra Sykkylven Energi AS
Ø 400 mm rør i duktilt støpejern, fall 390 m, lengde 1260 m



Figur 39: Oversiktskart rørbrudd Ramstaddal kraftverk.
Kilde: Sykkylven Energi AS



Figur 40: Flyfoto tatt nedstrøms bruddstedet som viser omfanget av skadene elva har påført terrenget. Kraftstasjonen oppe i venstre hjørne. Foto: Sykkylven Energi AS

Ramstaddal kraftverk inngår i Sykkylven vannverk som forsyner ca 1900 abonnenter i Sykkylven. Vannet hentes på kote 590 m.o.h. og tas ned til kraftstasjonen på kote 200 m.o.h. før det går videre til vannbehandling og ut til Sykkylven.

Hendelsen skjedde natt til 14. mars 2012. Det hadde vært svært stor vannføring i Årsetelva fra overløpet på Årsetvatnet. Overløpsvannet blanda seg med snøen i overløpet og i elveleiet nedstrøms og bygde seg etter hvert opp til en bølge som feia nedover elveleiet. Vannmassene tok med seg jord og stein nedover og påførte skade på rørgata der denne krysser Årsetelva, ca på kote 250 moh. Det var også skader på veiene i området. Det er ble observert lekkasje på en strekning på 30-40 meter av rørgata.

Sannsynlig bruddårsak: Store vannmasser pga nedbør/snøsmelting

4.3.17 Føssa Kraftverk, rørbrudd nr 2 og 3

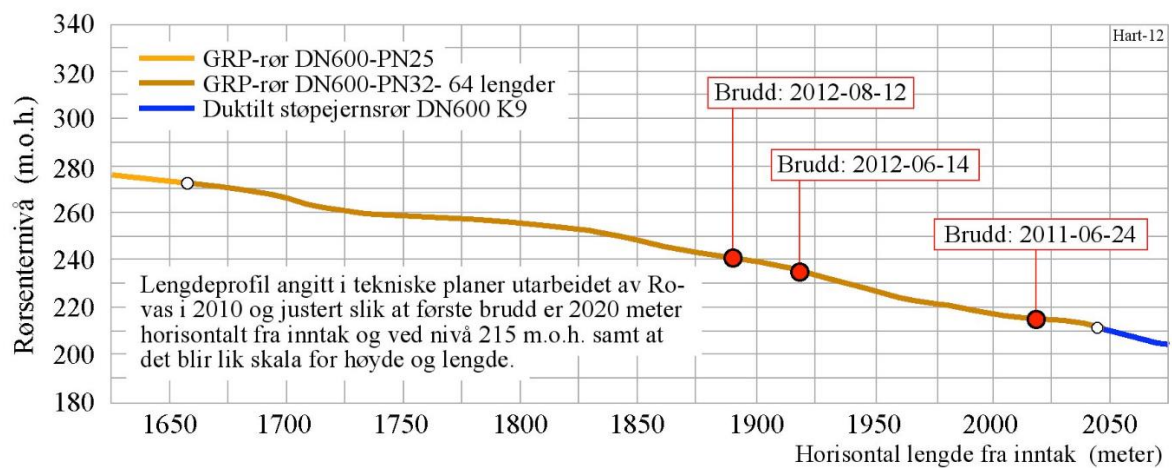
Kilde: Rapport og bilder sendt NVE av Føssa Kraft AS og Sivilingeniør Edvin Bakken AS

14.juni 2012 ble det oppdaga en mindre lekkasje. Oppgraving av røret viste avriving av ende av muffe og utblåst tetning. Skaden ble utbedret og anlegget ble satt i drift igjen 2. august 2012. Ti dager senere, den 12. august varsles det på nytt om en mindre lekkasje. Frilegging av skaden viser at også denne gangen er det feil i ei muffe i PN32 klassen som er årsak. Skadene på de tre første muffene i vist under i figur 41.



Figur 17 De tre bruddene pga svikt i muffene så langt ved Føssa kraftverk: venstre bilde 24. juni 2011, midten 14.juni 2012 og til høyre 12.08.2012. Kilde: NVE/Føssa Kraft AS

Alle de tre bruddene ligger i den delen av traseen med PN32 rør fra HOBAS. Figur 42 viser hvor i rørgata bruddene har oppstått.



Figur 18 Bruddene ved Føssa inntegna i utsnitt av grøftetrase. Kilde NVE/Føssa Kraft AS

Sakkyndig rapport skrevet av Ragnar Hartmann i Sivilingeniør Edvin Bakken AS, konkluderer med at bruddårsaken må være strukturelle feil ved muffene med hoveddata DN600 og PN32. Det anbefales derfor å skifte ut samtlige av komponentene i hele PN32-traseens lengde.

Sannsynlig bruddårsak: Strukturelle feil i muffe

4.3.18 Føssa Kraftverk, rørbrudd nr 4

Kilde: Rapport og bilder sendt NVE av Føssa Kraft AS og Sivilingeniør Edvin Bakken AS



Figur 19: Rørbrudd nr 4 ved Føssa Kraftverk. PN25 muffe. Kilde: Føssa Kraft AS/NVE

har fulgt etter og lekkasje har oppstått på oppstrøms side av muffa. Ettersom massene under røret var vaska ut hadde det oppstått en liten nedbøyning rundt rørskjøten.

Det fjerde bruddet førte til utskifting av alle GRP rør og muffe levert av HOBAS med trykkklasse PN16 og høyere på dette anlegget. Rør i PN32 og PN25 ble erstatta med duktile støpejernsrør og lavere trykklasser med GRP-rør fra en annen produsent. I alt ble 1206 av rørgatas totale lengde på 2220 meter skifta ut. Dette er videre beskrevet i pkt 4.4 om rettsaka mellom Føssa Kraft AS og HOBAS Rohre GmbH.

Sannsynlig bruddårsak: Strukturelle feil i muffe

4.3.19 Naurak Kraftverk

Kilde: Ragnar Hartmann (2012)

Det har vært til sammen 3 rørbrudd og ei lekkasje på rørgata fra 2005 til 2012. Rapporten sier lite detaljert om årsak. I 2005 oppstod det et rørbrudd som sannsynligvis skyldtes en stor stein som lå inntil røret. Samtidig klappa et rør sammen ca 205 meter nedstrøms dammen pga vakuum. Ved utbedringa ble rørgata filma innvendig og et rør 44 meter nedstrøms bruddstedet hadde også skader som gjorde at det ble skiftet ut.

I 2008 oppstod det et nytt rørbrudd, også pga stein inntil rørveggen. I løpet av året ble det også oppdaga ei lekkasje i et T-rør Ø250/400/500 mm. Lekkasjen skyldes sprekk i Ø250 mm del av T-stykket. Rørgata ble videospisert på nytt og et mistenkelig punkt ble identifisert ca 100 meter nedstrøms bruddstedet. Det var ved dette punktet rørbruddet i 2012 oppstod.

Sannsynlig bruddårsak: omfyllingsmassene har inneholdt uakseptabelt store steiner

4.3.20 Tverråga Kraftverk

Kilde: Rapporter og bilder sendt NVE av Norsk Grønnkraft og Norconsult
DN600 duktile støpejernsrør trykkklasse K9-K12, klasse 2



Figur 20 Kryssing av Tverråga under bygging. Kortrør DN600 "blåste" ut under rørbrytet. Kilde Norconsult/Norsk Grønnkraft
stabilitet.

3. juli 2014 varslet en nabo om at vannspruten stod til vær. Rørbrytsventilen ble utløst og rørgata tømte seg i løpet av kort tid. Bruddet er rett nedstrøms ei rørbryt der rørgatene fra to forskjellige inntak krysser elva Tverråga. I forbindelse med kryssinga er det brukt korte rør for å få avvinklinga til å gå opp. Røret som «blåste» ut var 2,8 m langt. Nedstrøms bryta og oppstrøms røret som gav etter er, det montert T-rør med mannhull for inspeksjon. Maks trykk ved bruddstedet er beregnet til 365 mVS. I teknisk plan var minimum overdekning angitt til 1,6 m og det skulle brukes lange rør før og etter rørbryta for å sikre

Norconsults beregninger slår fast at årsaken til brudd er for liten overdekning/fastholdelse i forhold til avvinkling mellom T-røret og 1. røret nedstrøms T-røret, kort rørlengde (kun 2,8 m) og vanntrykket i rørdelene. Utadretta kraft har vært større enn fastholdelsen. Plassering av T-røra rett nedstrøms bryta var uheldig og gjør det vanskelig å få til nok overdekning uten å støpe disse rørdelene inn.



Figur 21 T-stykket har bøyd seg opp til en avvinkling på 9,0 grader etter bruddet og et helt rørstykke på 2,8 m mangler. Kilde: Norconsult/Norsk Grønnkraft AS

Ved montasje har entreprenøren fulgt produsentens generelle leggeanvisning og dermed tillatt større avvinkling enn det stabilitetsberegningene i teknisk plan har lagt opp til. Opprinnelig prosjektert var T-rør oppstrøms rørbryta og et 6 m langt rør med maks tillatt avvinkling 2,5 grader nedstrøms. Røra på bryta skulle være uten avvinkling. Faktisk utført er T-rør nedstrøms bryta, lengde 2,8 m og avvinkling 2,8 grader. Overdekning over røra i skadeområdet ble oppmålt til 80 cm +/- 10 cm mot prosjektert 1,6 m. Sjekklistene viser at det er avvinklinger mellom røra i rørbryta og dette gir en utgående kraft som ikke var

planlagt i prosjekteringa. Når overdekninga i tillegg halveres blir utadretta kraft for stor til at røret blir liggende stabilt.

I rapporten nevnes det også at teknisk plan foreskriver fundament og omfylling med pukk 8-32 mm opp til kl. 10 og kl. 2 på rørene. Over røret kan benyttes elvegrus, komprimert pukk 8-32 mm eller harpede stedlige masser med steinstørrelse mindre enn 60 mm i en tykkelse på minimum 300 mm ut fra røret. Det som faktisk er utført er pukk opp til minimum kl 09 og 03 på røret, utført på en tilfredsstillende måte. Over øvre halvdel er det brukt stedlige masser men det dokumenteres ikke at disse massene ikke inneholder steiner større enn 60 mm.

Bruddårsak: Direkte årsak: for liten overdekning, indirekte årsak: for lite kontroll av utførelse på byggeplass av kyndig personell

4.3.21 Birkås kraftverk

Kilde: Rapport fra hendelsen sendt NVE, 2014

Det oppstod en sprekk i et DN 500 GRP-rør ved ei overgangskobling mellom GRP-rør og GJS-rør. Røret lå på forankringsklosser i dagen og sprekken ble oppdaga ved synlig vannstråle. Anlegget var ikke i drift.

Årsak til sprekken er at koblinga mellom GRP og GJS ikke har vært stabil nok. Avstanden mellom forankringsklossene har vært for stor slik at noe av vekten av GJS røret har hvilt



Figur 22 Sprekk i GRP-rør Birkås kraftverk. Foto: Småkraft AS



Figur 23 Sprekk i GRP-rør pga avvinkling i muffe. Foto: Småkraft AS

på koblinga. Dette har ført til ei nedover retta kraft på koblinga som har gitt avvinkling mellom røra i koblinga. Med avvinkling nedover har kanten på koblinga har pressa mot GRP-røret slik at det har oppstått en lokal trykksone på toppen av røret som førte til rift/sprekk.

Bruddårsak: for dårlig støtte under røret, manglende forankring

4.4 Planlagt rettsak mellom Føssa Kraft AS og Hobas Rohre GmbH

Rørbruddene ved Føssa Kraftverk er tidligere beskrevet som pkt 10, 17 og 18 i avsnitt 4.3 om rørbrudd. Rørgata ble bygd i perioden 2009-2011 og består øverst av GRP rør i trykkklasse PN6 til PN32 fra Hobas Rohre GmbH og duktile støpejernsrør nærmest kraftstasjonen. Glassfiberrøra er sammenføyd med utvendige muffe av glassfiber med gummiforinger som skulle sikre tilstrekkelig tetthet. Tre av bruddene har oppstått i DN 600 PN32 muffe og det fjerde oppstod i DN 600 PN 25 muffe.

Det fjerde bruddet førte til utskifting av alle GRP rør og muffe levert av HOBAS med trykkklasse PN16 og høyere på dette anlegget. Rør i PN32 og PN25 ble erstatta med duktile støpejernsrør og lavere trykklasser med GRP-rør fra en annen produsent. I alt ble 1206 meter av rørgatas totale lengde på 2220 meter skifta ut. Erstatningssøksmålet fra Føssa Kraft AS mot rørleverandøren HOBAS for kostandene med utskifting av rørene var beramma å gå i Sør-Trøndelag tingrett våren 2015. En måned før saken skulle opp inngikk partene forlik og det ble dermed ikke noen rettsak. Innholdet i forliket er ikke kjent.

Det foreligger offentlig tilgjengelige sluttinnlegg i saken. Føssa Kraft AS og deres sakkyndige Ragnar Hartmann fremholder at produktet som var levert hadde så store mangler at det ikke var forsvarlig å fortsette drift av kraftverket uten å skifte ut rørene. Da rørgata ble gravd opp ble det funnet flere muffe med begynnende skader av samme type som de fire tidligere bruddene. Føssa Kraft AS fremholder at muffene ikke var tilstrekkelig dimensjonert eller hadde et design som medførte utspredning av foringer under de høye vanntrykk som gjaldt.

HOBAS på sin side fremholder at rørene ved Føssa var lagt ovenfra og nedover og at dette avviker fra vanlig installasjonsprosedyre. Rørkoblingene fra HOBAS er konstruert slik at ved å starte nederst, vil

tyngdekrafta bidra til at rør og koblinger blir montert korrekt. Ved å starte øverst vil det kunne medføre at rørene sklir fra hverandre. Dette mener HOBAS er en medvirkende årsak til rørbruddene. Videre fremholder HOBAS at det er brukt feil omfyllingsmasser rundt rørene som kan gi ustabil fundament under og rundt rørene, uten at sluttinnlegget spesifiserer hva som er feil med massene.

5.2 Oppsummering av rørbruddsårsaker

Ett av formålene med denne oppgava var å se om det var systematiske feil som gikk igjen ved de rørbruddene som har oppstått. Materialet som er samla inn baserer seg dels på en presentasjon av Ragnar Hartmann fra 2012 og dels fra selskapenes innsendte rapporter til NVE. Ragnar Hartmann har bakgrunn som maskiningeniør fra NTH i 1968 og har skrevet store deler av kompendiet som brukes i NVEs kurs Damsikkerhet II. Han leies også inn som sakkyndig fagperson med NVE godkjenning, for eksempel som sakkyndig vitne i rettsaka mellom Føssa Kraft AS og Hobas Rohre GmbH. Det er derfor liten grunn til å tvile på de konklusjoner og årsakssammenhenger Hartmann har kommet fram til når det gjelder årsaken til de rørbruddene han har beskrevet. Fra 2010 ble alle anleggseiere pliktige til å varsle NVE om rørbrudd og slik sett skal datagrunnlaget være så komplett som mulig. Følgelig vurderes derfor det presenterte materialet som representativt for det som har skjedd de siste fem årene og usikkerheten rundt presenterte årsaker som lav.

Det er få felles faktorer å spore i de hendelsene som har oppstått. For dårlig oppfølging i byggeperiode av kyndig personell kan sies å være årsak til 6 av de 16 hendelsene som er beskrevet i detalj. De fire hendelsene på Føssa kraftverk tilskrives materialkvaliteten i muffene som var for dårlig. Tre skader kan tilskrives kraftig regn/snøsmelting. Ellers er det få felles faktorer.

Det som ser ut til å være felles for hendelsene er at de ikke har oppstått på grunn av feil i beregningsmodellene for prosjektering av rørstabiliteten. Altså er modellene som er i bruk så sikre at bruddene ikke har oppstått på grunn av feil i modellene. Dette gir ikke svar på om modellene er for sikre, men eksemplet med friksjonsfaktoren brukt i beregning av Sundli kraftverk ($\mu=0,25$) og beregningene til Bossel og Breien (2014) ($\mu=0,62$) viser at nødvendig overdekning regnes nesten 150 % større på Sundli kraftverk enn det Bossel og Breien legger til grunn i sine forsøk.

Slik sett er forsøkene i de tidligere master- og prosjektoppgavene nyttige for å belyse mekanismene og modellene som brukes for å beregne rørstabilitet. Det videre arbeidet med dette materialet kan ha som utgangspunkt å vurdere om vi bygger for sikkert og slik sett ikke utnytter samfunnets ressurser på en mest mulig effektiv måte.

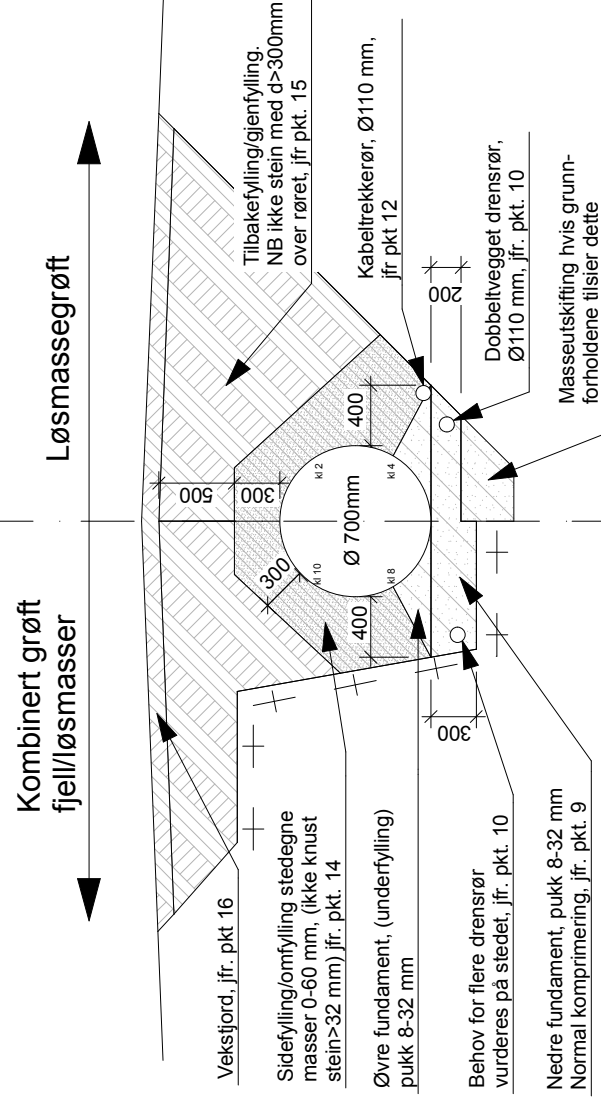
En annen slutning som kan trekkes når beregningsmodellene ikke er årsak til hendelsene som har oppstått, er at det ikke er inne på kontoret og i den papirmessige delen av prosjektering/utførelse at problemene oppstår. Flere av tilfellene kunne vært unngått med sakkyndig kontroll ute på byggeplass. Dermed bør det vurderes å flytte noe mer fokus og ressurser over fra innarbeid ved skrivebordene til den faktiske utførelsen ute på anlegget.

Vedlegg 4 Terrengprofiler og grøftetverrsnitt
besøkte kraftverk

GENERELLE ANVISNINGER:

1. Arbeidet skal utføres iht. rørleverandørens spesifikasjoner samt kontrollplaner.
2. Det skal føres tilsyn med arbeidet av fagkyndig personell og det skal fylles ut sjekklister under arbeidets gang.
3. Avvik i forutsetninger og spesielle forhold protokollføres og skal fortløpende rapporteres til byggherre.
4. Mulig vanntilsigs i terrenget samt bekker etc. skal avskjæres, samles og føres kontrollert forbi anleggstedet, jfr tegning nr A20-2 "Typisk bekkekryssning".
5. Vekstjord som flås av og senere skal tilbakeføres eller anvendes til andre formål, skal lagres i ranker med maksimal tykkelse 2m. Massene skal ikke komprimeres under lagring. Dette for å hindre at den lokale frøbanken skades.
6. Skråningshelning i grøft må tilpasses de lokale forhold og geotekniske forutsetninger. Svekkelse av overflatestabilitet som følge av regn/nedbør kan hindres ved tildekking med tett fiberduk eller presenning. Det refereres til forskrift for graving og avstiving av grøfter.
7. Det skal sikres at det ikke kan komme blokk trillende fra gravearbeider lenger opp i grøfta når det foregår arbeider i grøft. Monterte rør skal beskyttes ved graving oppstrøms. Det skal som minimum gjennomføres sikker jobbanalyse for arbeid i grøft og skrånende terreng, samt for håndtering av rør. Det skal løpende foretas vurderinger om sikkerheten er ivaretatt.
8. Det tillates ikke frost i trauet (grøftesider og bunn) eller rørseng, omfyllings- eller tilbakefyllingsmassene. Ved vinterarbeid skal nødvendige forhåndsregler tas for å unngå dette (jobbe i korte seksjoner og/eller isolere trauet og tilbakefyllingsmassene under arbeidets gang).
9. Fundamentet/rørsengen skal ha en tykkelse som angitt på snitt. Der hvor stein, harde partier, bløt, løs, ustabil og/eller svellende masse finnes i grøftebunn, kan det være nødvendig å øke tykkelsen på fundament / rørseng for å oppnå lik langsgående støtte for røret.
10. Drenerør legges i rørfundamentet og skal føres ut til siden og ut på terreng for hver 100-200m. Fundamentet gis normal komprimering iht. NS 3458. Krav til komprimering gjelder også ved muffene. Ved hvert uttrekk av drenerør skal det anlegges en terskel av av tette masser (leire, morene i duk) evt. betong. Terskelen skal gå min 1/3 opp på røret. Det benyttes fiberduk for å beskytte dreneringen der det er fare for tilslemming med finstoff fra omkringliggende masser.
11. Etter at rørseng/fundament er preparert og planert må området der røret skal ligge løsnes i en bredde på ca. 150 mm (f.eks. med rake) til en dybde av maksimalt 50 mm. Dette vil utgjøre en veldefinert kontakflate for røret. Rørsengen må være forsenket ved hver muffe (duktile rør) for å unngå at røret ligger og rir på muffene.
12. Kabeltrekkerør av typen PP 110mm x 4mm x 6m m/muffe SN8 røde - eller tilsvarende. For trekking av lavspenstkabel med blåserør for fiber mellom inntak og kraftstasjon. Røret kan legges på fundamentet for trykkørret men så langt til siden at det skal kunne graves ned på uten å skade trykkørret.
13. Omfylling av trykkørret skal utføres i hht. snitt og rørleverandørens spesifikasjoner. Duktile rør er ringstive og det stilles derfor ikke krav til komprimering av omfyllingsmassene. PE-rør er fleksible og tåler noe deformasjon, men det er viktig at rørene har god sidestøtte for å hindre ovalitet.
14. Til minimum 300 mm over rør skal det normalt fylles med masser av samme kvalitet og fraksjon som omfyllingsmassene. Det kan som alternativ benyttes sand eller stedeagne masser av enklere kvalitet over kl. 2 og 10 forutsatt at kornstørrelsen er iht rørleverandørens spesifikasjoner. Ved trafikklaster skal det fylles pukk 8-32mm i hele grøftas bredde og utføres normal komprimering. Komprimeringen over rør må kun foretas iht rørleverandørens spesifikasjoner. Det benyttes fiberduk for å beskytte dreneringen der det er fare for tilslemming med finstoff fra omkringliggende masser.
15. Over omfyllingen fylles det tilbake med stedlige masser eller masser som er egnet til formålet. Stor stein (>300mm) skal ikke legges direkte over røret. Det må i bratte skråninger og/eller der det er vannsig tas hensyn til fare for overflateerosjon. Krav til overdekning er avhengig av dimensjon og trykk samt vinkelendringer i vertikalkanalen. Generell minimum overdekning er oppgitt på typisk grøftesnitt, men der overdekningskravet er strengere oppgis dette i teknisk plan. Dersom overfyllingen blir mer enn 3m, bør det vurderes tiltak for å hindre for stort trykk på rørene.
16. Over tilbakefyllingen legges det vekstjord som er mellomlagret langs rørgata. Normalt vil frøbanken i vekstjorda kunne reetablere vegetasjon. I enkelte tilfeller er det nødvendig å treffe tiltak (nett, kokosmattar ei.tilsv.) for å sikre overflaten mot erosjon til stedlig vegetasjon får reetablere seg. NB! Vekstlaget kan ikke tas med i beregningen av nødvendig overdekning.

Typisk grøftesnitt for rørgate av PE og duktilt støpejern




Typisk grøftverrsnitt

		Godkjent:
Prosjekt: Tverråne kraftverk Todalen 3540 Nesbyen		Kontroll prosjekt Kontroll: Sign.: EA
Tilakshaver: Norsk Grønnkraft AS Pb. 4270 Nydalen, 0401 Oslo Hovedkontor: Sandakerveien 138, 0484 Oslo Sentralbord: 69 11 25 10 post@norskgronnkraft.no www.norskgronnkraft.no		Fiinavn: Tverråne - Typisk grøftverrsnitt duktile og PE-rør Dato: 03.09.2014 Målestokk: 1:50 Kontroll utførende Sign.: Kontroll: Prosjektnr. for prosjekterende/lev
Prosjektnr.: A20-1	Tegningsnr.:	Prosjektnr. for prosjekterende/lev
Type tegning: Grøftverrsnitt A3		

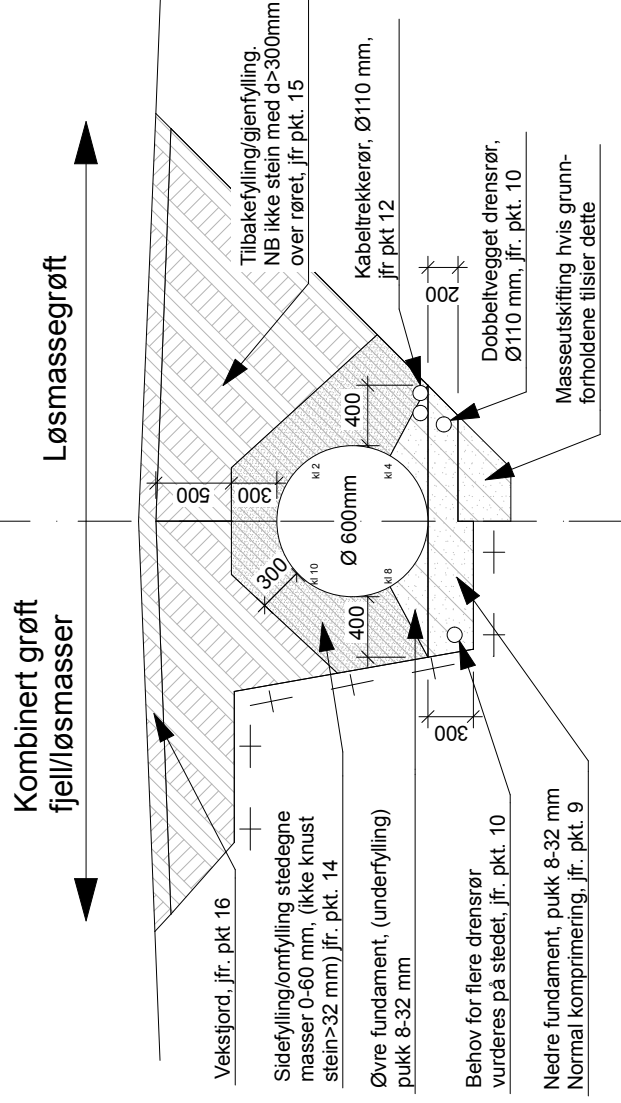
GENERELLE ANVISNINGER:

- Arbeidet skal utføres iht. rørleverandørens spesifikasjoner samt kontrollplaner.
- Det skal føres tilsyn med arbeidet av fagkyndig personell og det skal fylles ut sjekklister under arbeidets gang.
- Avvik i forutsetninger og spesielle forhold protokollføres og skal fortløpende rapporteres til byggherre.
- Mulig vanntilsigs i terrenget samt bekker etc. skal avskjæres, samles og føres kontrollert forbi anleggstedet, jfr tegning nr A20-2 "Typisk bekkekryssning".
- Vekstjord som flås av og senere skal tilbakeføres eller anvendes til andre formål, skal lagres i ranker med maksimal tykkelse 2m. Massene skal ikke komprimeres under lagring. Dette for å hindre at den lokale frøbanken skades.
- Skråningshelning i grøft må tilpasses de lokale forhold og geotekniske forutsetninger. Svekkelse av overflatestabilitet som følge av regn/nedbør kan hindres ved tildekking med tett fiberduk eller presenning. Det refereres til forskrift for graving og avstiving av grøfter.
- Det skal sikres at det ikke kan komme blokk trillende fra gravearbeider lenger opp i grøfta når det foregår arbeider i grøft. Monterte rør skal beskyttes ved graving oppstrøms. Det skal som minimum gjennomføres sikker jobbanalyse for arbeid i grøft og skrånende terreng, samt for håndtering av rør. Det skal løpende foretas vurderinger om sikkerheten er ivaretatt.
- Det tillates ikke frost i trauret (grøftesider og bunn) eller rørseng, omfyllings- eller tilbakefyllingsmassene. Ved vinterarbeid skal nødvendige forhåndsregler tas for å unngå dette (jobbe i korte seksjoner og/eller isolere trauret og tilbakefyllingsmassene under arbeidets gang).
- Fundamentet/rørsengen skal ha en tykkelse som angitt på snitt. Der hvor stein, harde partier, bløt, løs, ustabil og/eller svellende masse finnes i grøftebunn, kan det være nødvendig å øke tykkelsen på fundament / rørseng for å oppnå lik langsgående støtte for røret.
- Drensrør legges i rørfundamentet og skal føres ut til siden og ut på terreng for hver 100-200m. Fundamentet gis normal komprimering iht. NS 3458. Krav til komprimering gjelder også ved muffene. Ved hvert uttrekk av drensrør skal det anlegges en terskel av av tette masser (leire, morene i duk) evt. betong. Terskelen skal gå min 1/3 opp på røret. Det benyttes fiberduk for å beskytte dreneringen der det er fare for tilslemming med finstoff fra omkringliggende masser.
- Etter at rørseng/fundament er preparert og planert må området der røret skal ligge løsnes i en bredde på ca. 150 mm (f.eks. med rake) til en dybde av maksimalt 50 mm. Dette vil utgjøre en veldefinert kontakflate for røret. Rørsengen må være forsenket ved hver muffe (duktile rør) for å unngå at røret ligger og rir på muffene.
- Kabeltrekkerør av typen PP 110mm x 4mm x 6m m/muffe SN8 røde - eller tilsvarende. Ett rør for trekking av lavspentkabel med blåserør og kraftstasjon og ett rør for trekking av høyspentkabel mellom kraftstasjon og inntak. Rørene kan legges på fundamentet for trykkørret men så langt til siden at det skal kunne graves ned på uten å skade trykkørret. Rørene skal være tilgjengelige i forbindelse med inspeksjonskummene som er for hver 500 m.
- Omfylling av trykkørret skal utføres i hht. snitt og rørleverandørens spesifikasjoner. Duktile rør er ringstive og det stilles derfor ikke krav til komprimering av omfyllingsmassene. PE-rør er fleksible og tåler noe deformasjon, men det er viktig at rørene har god sidestøtte for å hindre ovalitet.
- Til minimum 300 mm over rør skal det normalt fylles med masser av samme kvalitet og fraksjon som omfyllingsmassene. Det kan som alternativ benyttes sand eller stedeagne masser av enklere kvalitet over kl. 2 og 10 forutsatt at kornstørrelsen er iht rørleverandørens spesifikasjoner. Ved trafikklaster skal det fylles pukk 8-32mm i hele grøftas bredde og utføres normal komprimering. Komprimeringen over rør må kun foretas iht rørleverandørens spesifikasjoner. Det benyttes fiberduk for å beskytte dreneringen der det er fare for tilslemming med finstoff fra omkringliggende masser.
- Over omfyllingen fylles det tilbake med stedlige masser eller masser som er egnet til formålet. Stor stein ($d > 300\text{mm}$) skal ikke legges direkte over røret. Det må i bratte skråninger og/eller der det er vannsig tas hensyn til fare for overflateerosjon. Krav til overdekning er avhengig av dimensjon og trykk samt vinkelendringer i vertikalanpart. Generell minimum overdekning er oppgitt på typisk grøftesnitt, men der overdekningskravet er strengere oppgis dette i teknisk plan. Dersom overfyllingen blir mer enn 3m, bør det vurderes tiltak for å hindre for stort trykk på rørene.
- Over tilbakefyllingen legges det vekstjord som er mellomlagret langs rørgata. Normalt vil frøbanken i vekstjorda kunne reetablere vegetasjon. I enkelte tilfeller er det nødvendig å treffe tiltak (nett, kokosmattar ei.tilsv.) for å sikre overflaten mot erosjon til stedlig vegetasjon får reetablere seg. NB! Vekstlaget kan ikke tas med i beregningen av nødvendig overdekning.

Typisk grøftverrsnitt

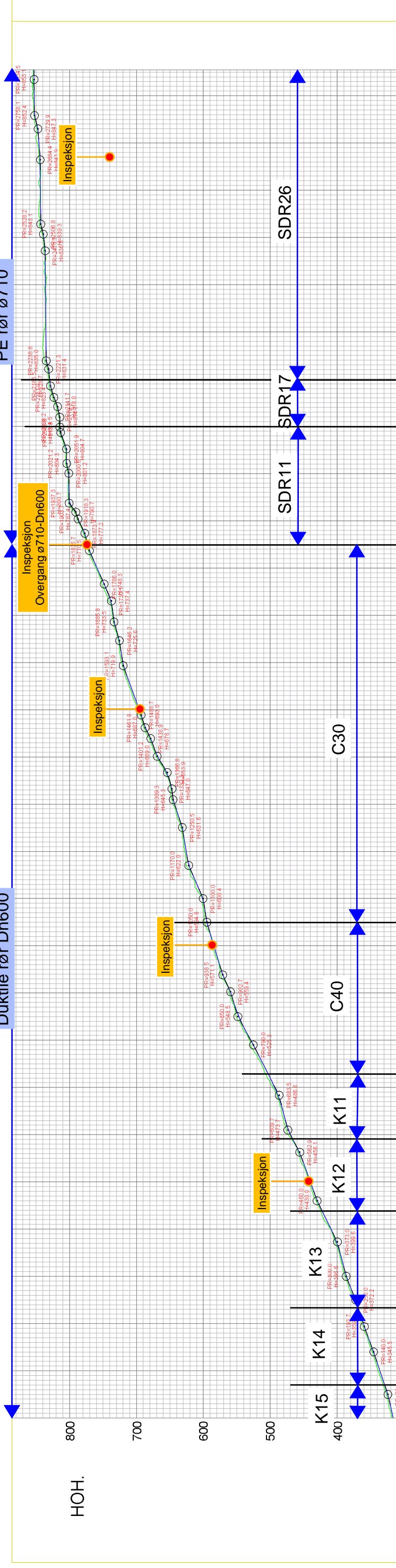
	Godkjent:
	Kontroll prosjekt
Prosjekt: Nybuelve kraftverk Totalen 3540 Nesbyen	Sign.: EA
	Kontroll:
Tilakshaver: Norsk Grønnkraft AS Pb. 4270 Nydalen, 0401 Oslo Hovedkontor: Sandakerveien 138, 0484 Oslo Sentralbord: 69 11 25 10 post@norskgronnkraft.no www.norskgronnkraft.no	Sign.: Nybuelve - Typisk grøftverrsnitt duktile og PE-rør
	Dato: 03.09.2014
Målestokk: 1:50	Kontroll utførende
	Sign.:
Prosjektnr.: A20-1	Tegningsnr.:
	Prosjekt nr. for prosjekterende/lev
Type tegning: Grøftverrsnitt A3	

Typisk grøftesnitt for rørgate av PE og duktilt støpejern

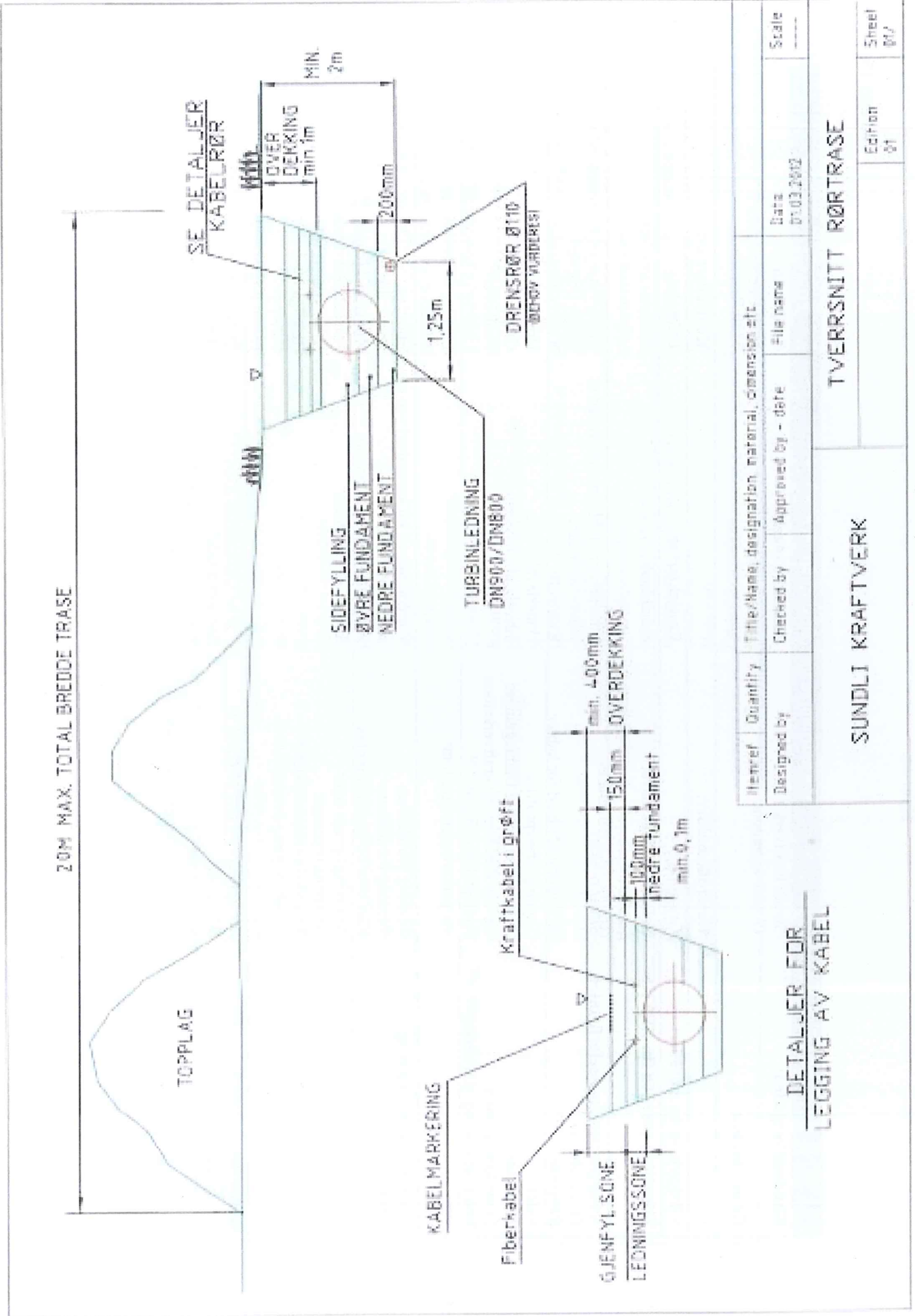


Duktile rør Dn600

PE rør ø710



TER. HØYDE	47.8	48.0	48.2	48.4	48.6	48.8	49.0	49.2	49.4	49.6	49.8	50.0	50.2	50.4	50.6	50.8	51.0	51.2	51.4	51.6	51.8	52.0	52.2	52.4	52.6	52.8	53.0	53.2	53.4	53.6	53.8	54.0	54.2	54.4	54.6	54.8	55.0	55.2	55.4	55.6	55.8	56.0	56.2	56.4	56.6	56.8	57.0	57.2	57.4	57.6	57.8	58.0	58.2	58.4	58.6	58.8	59.0	59.2	59.4	59.6	59.8	60.0	60.2	60.4	60.6	60.8	61.0	61.2	61.4	61.6	61.8	62.0	62.2	62.4	62.6	62.8	63.0	63.2	63.4	63.6	63.8	64.0	64.2	64.4	64.6	64.8	65.0	65.2	65.4	65.6	65.8	66.0	66.2	66.4	66.6	66.8	67.0	67.2	67.4	67.6	67.8	68.0	68.2	68.4	68.6	68.8	69.0	69.2	69.4	69.6	69.8	70.0	70.2	70.4	70.6	70.8	71.0	71.2	71.4	71.6	71.8	72.0	72.2	72.4	72.6	72.8	73.0	73.2	73.4	73.6	73.8	74.0	74.2	74.4	74.6	74.8	75.0	75.2	75.4	75.6	75.8	76.0	76.2	76.4	76.6	76.8	77.0	77.2	77.4	77.6	77.8	78.0	78.2	78.4	78.6	78.8	79.0	79.2	79.4	79.6	79.8	80.0	80.2	80.4	80.6	80.8	81.0	81.2	81.4	81.6	81.8	82.0	82.2	82.4	82.6	82.8	83.0	83.2	83.4	83.6	83.8	84.0	84.2	84.4	84.6	84.8	85.0	85.2	85.4	85.6	85.8	86.0	86.2	86.4	86.6	86.8	87.0	87.2	87.4	87.6	87.8	88.0	88.2	88.4	88.6	88.8	89.0	89.2	89.4	89.6	89.8	90.0	90.2	90.4	90.6	90.8	91.0	91.2	91.4	91.6	91.8	92.0	92.2	92.4	92.6	92.8	93.0	93.2	93.4	93.6	93.8	94.0	94.2	94.4	94.6	94.8	95.0	95.2	95.4	95.6	95.8	96.0	96.2	96.4	96.6	96.8	97.0	97.2	97.4	97.6	97.8	98.0	98.2	98.4	98.6	98.8	99.0	99.2	99.4	99.6	99.8	100.0	100.2	100.4	100.6	100.8	101.0	101.2	101.4	101.6	101.8	102.0	102.2	102.4	102.6	102.8	103.0	103.2	103.4	103.6	103.8	104.0	104.2	104.4	104.6	104.8	105.0	105.2	105.4	105.6	105.8	106.0	106.2	106.4	106.6	106.8	107.0	107.2	107.4	107.6	107.8	108.0	108.2	108.4	108.6	108.8	109.0	109.2	109.4	109.6	109.8	110.0	110.2	110.4	110.6	110.8	111.0	111.2	111.4	111.6	111.8	112.0	112.2	112.4	112.6	112.8	113.0	113.2	113.4	113.6	113.8	114.0	114.2	114.4	114.6	114.8	115.0	115.2	115.4	115.6	115.8	116.0	116.2	116.4	116.6	116.8	117.0	117.2	117.4	117.6	117.8	118.0	118.2	118.4	118.6	118.8	119.0	119.2	119.4	119.6	119.8	120.0	120.2	120.4	120.6	120.8	121.0	121.2	121.4	121.6	121.8	122.0	122.2	122.4	122.6	122.8	123.0	123.2	123.4	123.6	123.8	124.0	124.2	124.4	124.6	124.8	125.0	125.2	125.4	125.6	125.8	126.0	126.2	126.4	126.6	126.8	127.0	127.2	127.4	127.6	127.8	128.0	128.2	128.4	128.6	128.8	129.0	129.2	129.4	129.6	129.8	130.0	130.2	130.4	130.6	130.8	131.0	131.2	131.4	131.6	131.8	132.0	132.2	132.4	132.6	132.8	133.0	133.2	133.4	133.6	133.8	134.0	134.2	134.4	134.6	134.8	135.0	135.2	135.4	135.6	135.8	136.0	136.2	136.4	136.6	136.8	137.0	137.2	137.4	137.6	137.8	138.0	138.2	138.4	138.6	138.8	139.0	139.2	139.4	139.6	139.8	140.0	140.2	140.4	140.6	140.8	141.0	141.2	141.4	141.6	141.8	142.0	142.2	142.4	142.6	142.8	143.0	143.2	143.4	143.6	143.8	144.0	144.2	144.4	144.6	144.8	145.0	145.2	145.4	145.6	145.8	146.0	146.2	146.4	146.6	146.8	147.0	147.2	147.4	147.6	147.8	148.0	148.2	148.4	148.6	148.8	149.0	149.2	149.4	149.6	149.8	150.0	150.2	150.4	150.6	150.8	151.0	151.2	151.4	151.6	151.8	152.0	152.2	152.4	152.6	152.8	153.0	153.2	153.4	153.6	153.8	154.0	154.2	154.4	154.6	154.8	155.0	155.2	155.4	155.6	155.8	156.0	156.2	156.4	156.6	156.8	157.0	157.2	157.4	157.6	157.8	158.0	158.2	158.4	158.6	158.8	159.0	159.2	159.4	159.6	159.8	160.0	160.2	160.4	160.6	160.8	161.0	161.2	161.4	161.6	161.8	162.0	162.2	162.4	162.6	162.8	163.0	163.2	163.4	163.6	163.8	164.0	164.2	164.4	164.6	164.8	165.0	165.2	165.4	165.6	165.8	166.0	166.2	166.4	166.6	166.8	167.0	167.2	167.4	167.6	167.8	168.0	168.2	168.4	168.6	168.8	169.0	169.2	169.4	169.6	169.8	170.0	170.2	170.4	170.6	170.8	171.0	171.2	171.4	171.6	171.8	172.0	172.2	172.4	172.6	172.8	173.0	173.2	173.4	173.6	173.8	174.0	174.2	174.4	174.6	174.8	175.0	175.2	175.4	175.6	175.8	176.0	176.2	176.4	176.6	176.8	177.0	177.2	177.4	177.6	177.8	178.0	178.2	178.4	178.6	178.8	179.0	179.2	179.4	179.6	179.8	180.0	180.2	180.4	180.6	180.8	181.0	181.2	181.4	181.6	181.8	182.0	182.2	182.4	182.6	182.8	183.0	183.2	183.4	183.6	183.8	184.0	184.2	184.4	184.6	184.8	185.0	185.2	185.4	185.6	185.8	186.0	186.2	186.4	186.6	186.8	187.0	187.2	187.4	187.6	187.8	188.0	188.2	188.4	188.6	188.8	189.0	189.2	189.4	189.6	189.8	190.0	190.2	190.4	190.6	190.8	191.0	191.2	191.4	191.6	191.8	192.0	192.2	192.4	192.6	192.8	193.0	193.2	193.4	193.6	193.8	194.0	194.2	194.4	194.6	194.8	195.0	195.2	195.4	195.6	195.8	196.0	196.2	196.4	196.6	196.8	197.0	197.2	197.4	197.6	197.8	198.0	198.2	198.4	198.6	198.8	199.0	199.2	199.4	199.6	199.8	200.0	200.2	200.4	200.6	200.8	201.0	201.2	201.4	201.6	201.8	202.0	202.2	202.4	202.6	202.8	203.0	203.2	203.4	203.6	203.8	204.0	204.2	204.4	204.6	204.8	205.0	205.2	205.4	205.6	205.8	206.0	206.2	206.4	206.6	206.8	207.0	207.2	207.4	207.6	207.8	208.0	208.2	208.4	208.6	208.8	209.0	209.2	209.4	209.6	209.8	210.0	210.2	210.4	210.6	210.8	211.0	211.2	211.4	211.6	211.8	212.0	212.2	212.4	212.6	212.8	213.0	213.2	213.4	213.6	213.8	214.0	214.2	214.4	214.6	214.8	215.0	215.2	215.4	215.6	215.8	216.0	216.2	216.4	216.6	216.8	217.0	217.2	217.4	217.6	217.8	218.0	218.2	218.4	218.6	218.8	219.0	219.2	219.4	219.6	219.8	220.0	220.2	220.4	220.6	220.8	221.0	221.2	221.4	221.6	221.8	222.0	222.2	222.4	222.6	222.8	223.0	223.2	223.4	223.6	223.8	224.0	224.2	224.4	224.6	224.8	225.0	225.2	225.4	225.6	225.8	226.0	226.2	226.4	226.6	226.8	227.0	227.2	227.4	227.6	227.8	228.0	228.2	228.4	228.6	228.8	229.0	229.2	229.4	229.6	229.8	230.0	230.2	230.4	230.6	230.8	231.0	231.2	231.4	231.6	231.8	232.0	232.2	232.4	232.6	232.8	233.0	233.2	233.4	233.6	233.8	234.0	234.2	234.4	234.6	234.8	235.0	235.2	235.4	235.6	235.8	236.0	236.2	236.4	236.6	236.8	237.0	237.2	237.4	237.6	237.8	238.0	238.2	238.4	238.6	238.8	239.0	239.2	239.4	239.6	239.8	240.0	240.2	240.4	240.6	240.8	241.0	241.2	241.4	241.6	241.8	242.0	242.2	242.4	242.6	242.8	243.0	243.2	243.4	243.6	243.8	244.0	244.2	244.4	244.6	244.8	245.0	245.2	245.4	245.6	245.8	246.0	246.2	246.4	246.6	246.8	247.0	247.2	247.4	247.6	247.8	248.0	248.2	248.4	248.6	248.8	249.0	249.2	249.4	249.6	249.8	250.0	250.2	250.4	250.6	250.8	251.0	251.2	251.4	251.6	251.8	252.0	252.2	252.4	252.6	252.8	253.0	253.2	253.4	253.6	253.8	254.0	254.2	254.4	254.6	254.8	255.0	255.2	255.4	255.6	255.8	256.0	256.2	256.4	256.6	256.8	257.0	257.2	257.4	257.6	257.8	258.0	258.2	258.4	258.6	258.8	259.0	259.2	259.4	259.6	259.8	260.0	260.2	260.4	260.6	260.8	261.0	261.2	261.4	261.6	261.8	262.0	262.2	262.4	262.6	262.8	263.0	263.2	263.4	263.6	263.8	264.0	264.2	264.4	264.6	264.8	265.0	265.2	265.4	265.6	265.8	266.0	266.2	266.4	266.6	266.8	267.0	267.2	267.4	267.6	267.8	268.0	268.2	268.4	268.6	268.8	269.0	269.2	269.4	269.6	269.8	270.0	270.2	270.4	270.6	270.8	271.0	271.2	271.4	271.6	271.8	272.0	272.2	272.4	272.6	272.8	273.0	273.2	273.4	273.6	273.8	274.0	274.2	274.4	274.6	274.8	275.0	275.2	275.4	275.6	275.8	276.0	276.2	276.4	276.6	276.8	277.0	277.2	277.4	277.6	277.8	278.0	278.2	278.4	278.6	278.8	279.0	279.2	279.4	279.6	279.8	280.0	280.2	280.4	280.6	280.8	281.0	281.2	281.4	281.6	281.8	282.0	282.2	282.4	282.6	282.8	283.0	283.2	283.4	283.6	283.8	284.0	284.2	284.4	284.6	284.8	285.0	285.2	285.4	285.6	285.8	286.0	286.2	286.4	286.6	286.8	287.0	287.2	287.4	287.6	287.8	288.0	288.2	288.4	288.6	288.8	289.0	289.2	289.4	289.6	289.8	290.0	290.2	290.4	290.6	290.8	291.0	291.2	291.4	291.6	291.8	292.0	292.2	292.4	292.6	292.8	293.0	293.2	293.4	293.6	293.8	294.0	294.2	294.4	294.6	294.8	295.0	295.2	295.4
------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



DETALJER FOR
LEGGING AV KABEL

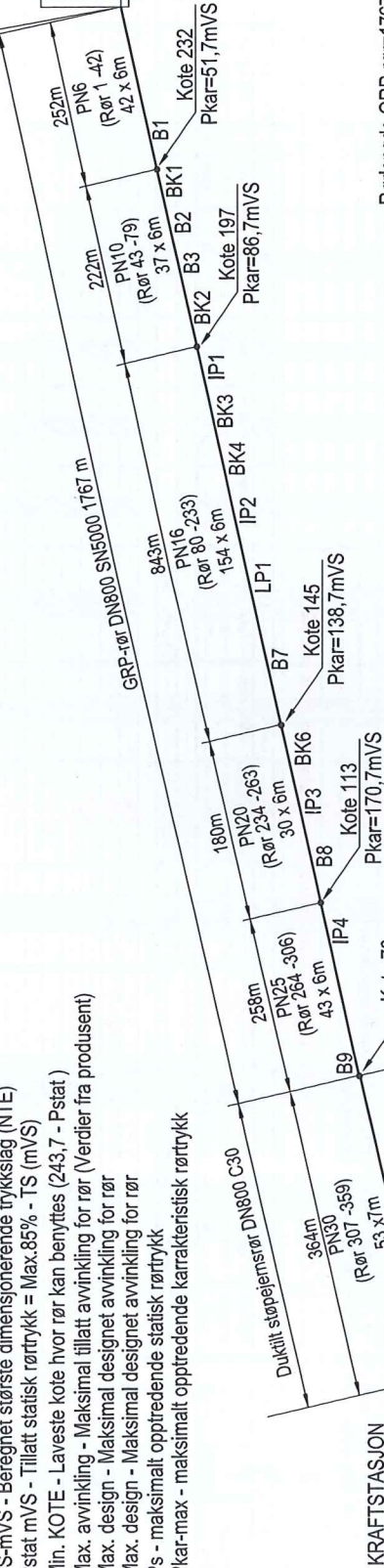
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc.	File name	Date	Scale
Designed by	Checked by	Approved by - date	File name	Date	Scale
SUNDLI KRAFTVERK			TVERSNITT RØRTRASE		
				Edition	Sheet
				01	01/

Rørtype/klasse	Max. mVS	Max. 85%	TS-mVS	Pstat mVS	Min. KOTE	Max. avvinkling	Max. design
GRP - PN6	61,18	52,00	40	12,00	231,7	2 grader	1,5 grader
GRP - PN10	101,97	86,67	40	46,61	197,09	2 grader	1,5 grader
GRP - PN16	163,15	138,67	40	98,67	145,03	2 grader	1,5 grader
GRP - PN20	200,88	170,74	40	130,74	112,96	1,5 grad	1,0 grader
GRP - PN25	244,73	208,02	40	168,02	75,68	1,3 grad	0,8 grader
Ductil - C30	305,91	260,02	40	220,0	23,70	4 grader	3,0 grader

Max. mVS - Rørets nominelle driftstrykk i mVS
 Max. 85% - Rørets nominelle driftstrykk i mVS med 85% utnyttelse
 TS-mVS - Beregnet største dimensjonerende trykkslag (NTE)
 Pstat mVS - Tillatt statisk rørrykk = Max.85% - TS (mVS)
 Min. KOTE - Laveste kote hvor rør kan benyttes (243,7 - Pstat)
 Max. avvinkling - Maksimal tillatt avvinkling for rør (Verdier fra produsent)
 Max. design - Maksimal designet avvinkling for rør
 Max. design - Maksimal designet avvinkling for rør
 Ps - maksimalt opp tredende statisk rørrykk
 Pkar-max - maksimalt opp tredende karakteristisk rørrykk

KOORDINAT
 Euref89 UTMStone32
 N7012848
 Ø543105

INNTAKSKUM
 DFV kote 243,7
 HRV kote 242,5
 C.L.L.Rør kote238,1
 Bunn.Rør kote237,7



Rørlengde GRP-rør=1767 m
 Rørlengde Duktile støpejernsrør=364m
 Total samlet rørlengde=2125m

Største dimensjonerende trykk=24,52Bar
 (Inkludert trykkslag- 40mVS)

Turbineeffekt: 1400KW
 Nominell slukeevne turbin: 846 l/s
 Slukeevne bypassventil: 423 l/s (BV)

KRAFTSTASJON
 (BV)
 Kote34 c.o.p. - Kote 33,58 b.o.p.
 Ps=20,6,0Bar
 Ps=210,12mVS (statisk trykk)
 Pkar-max=250,12mVS / 24,52Bar (Ps+TS (40mVS))

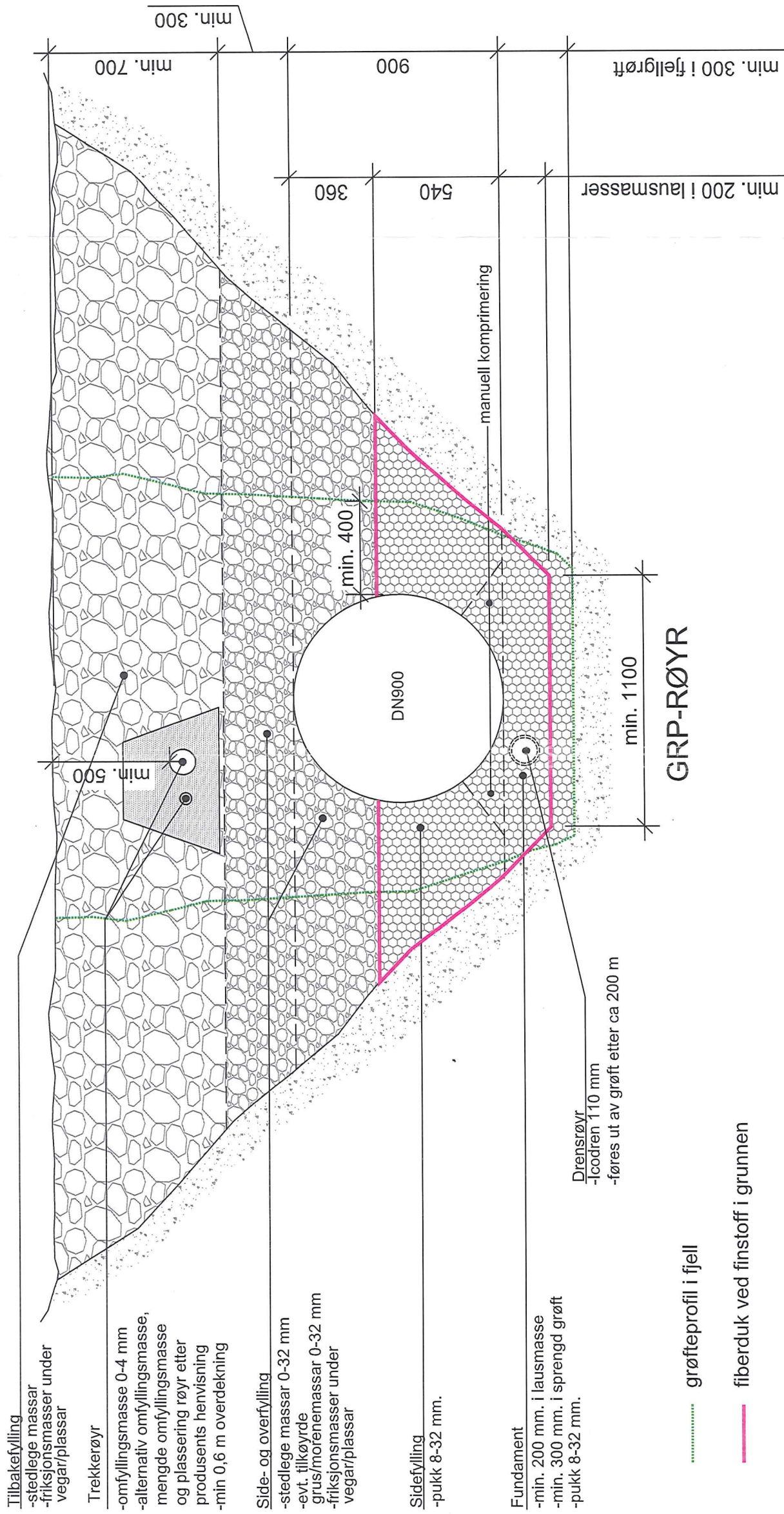
KOORDINAT
 Euref89 UTMStone32
 N 7014392
 Ø 541999

Forkortelser:
 B1,B2,B3,B7,B8,B9-Rørbønd med fundament
 IP1,IP2,IP3,IP4-Inspeksjonspunkt i kummer
 BK1,BK2,BK3,BK4,BK6,BK7-Bekkekryssing
 LP1-Luftepunkt med luftventil.

NOTE:
 Data er basert på Flowfitte GRP Rør og PAM Duktilrør
 Minimum overdekning fra top rør = 1 meter
 Rørledning er generelt designet med 6 m rørlengder for GRP rør. 3 m rørlengder kan benyttes ved behov.
 Rørledning er generelt designet med 7 m rørlengder for Duktile støpejernsrør. Kortere rørlengder kan benyttes ved behov.

Rev. 24.05.13

SECTION NR.				SECTION	REVISION
SEC. CODE	IND TYPE	AREA CODE	PINL. CODE	SHEET	REV.
RØRLEDNING OVERSIKTSKISSE				SUNDLI KRAFTVERK	
SCALE	SIZE	SYSTEM CODE	DRG. CODE	DOCUMENT NO	



..... grøfteprofil i fjell

— fiberduk ved finstoff i grunnen

DOKUMENTASJONSTEGNING
 ARBEIDSTEGNING
 ANBUDSTEGNING
 FØREBELS TEGNING

Clemens Kraft
 Pb. 535 Sentrum, 0105 Oslo

Væla Kraftverk
 Grøfteprofil

Bystøl a/s
 Rådg. ing. byggekunns. NRIIF

6893 VIK I SOGN
 Avdeling Voss
 Bergblads Pb. 102
 5701 Voss
 Telefon : 57 69 65 80
 Telefax : 57 65 81 65
 E-post: voss@bystol.no
 www.bystol.no

Mål
 1:20

Format
 A3

Rev.
 115

Teikn.Nr.
 115

Proj.nr.
 12117

Kontr. AF

Teikn. SAD

Dat.
 26.02.13

Sign.

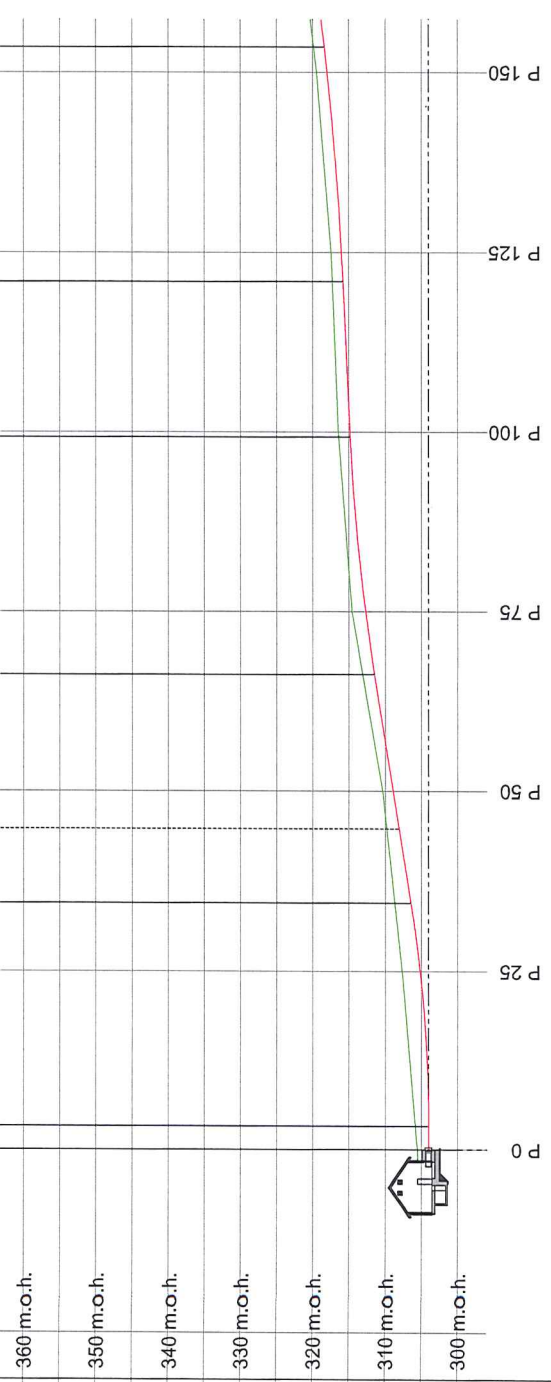
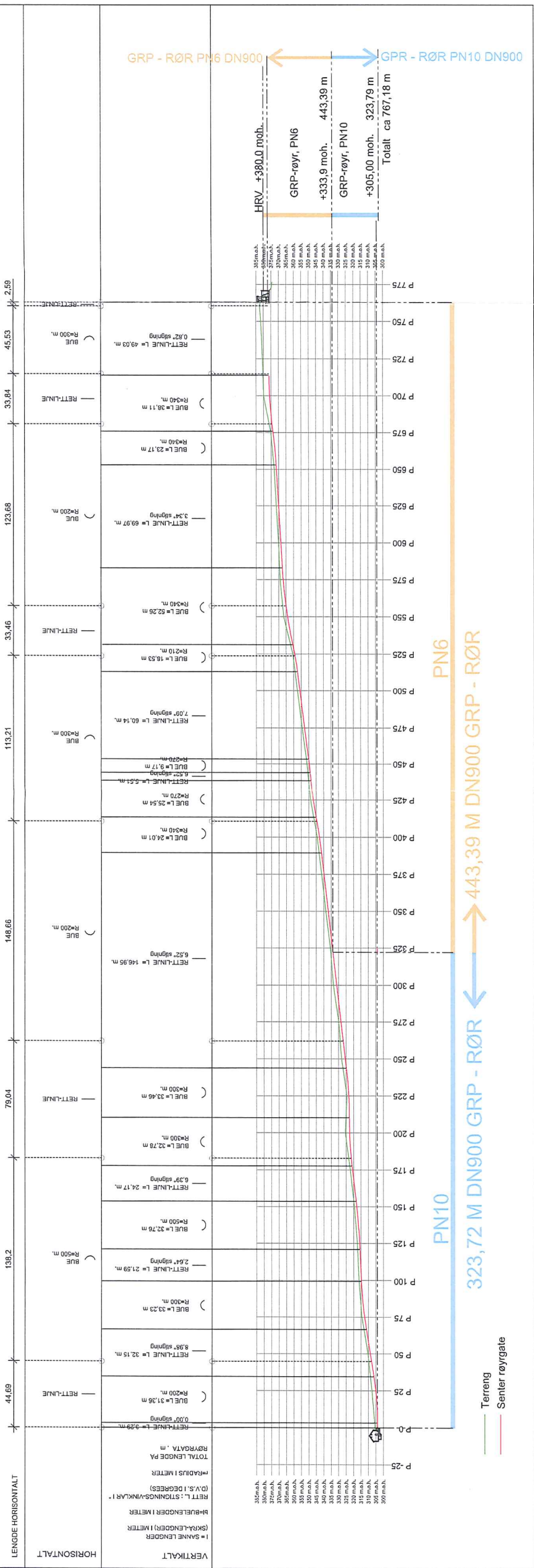
Ant.

Rev.

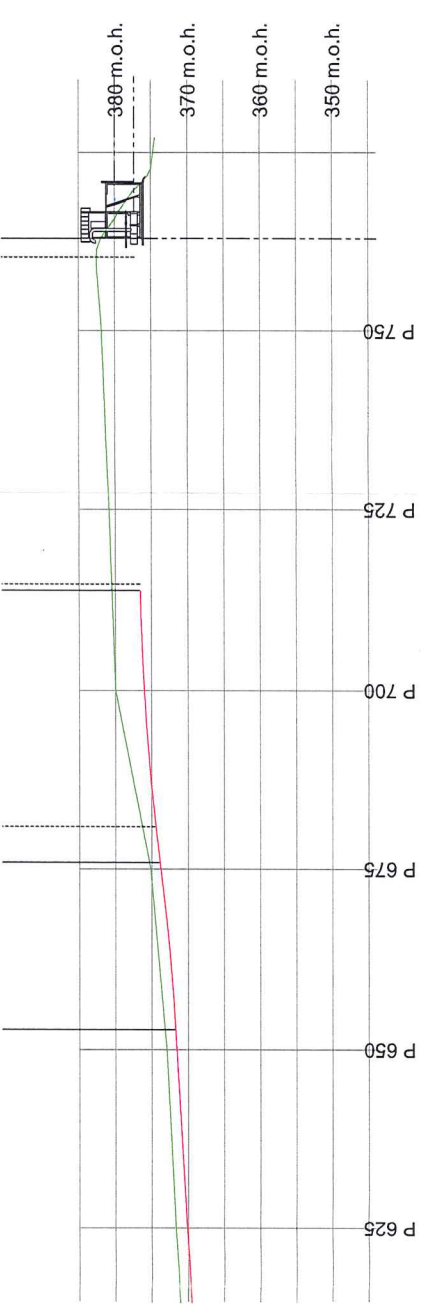
Revideringen gjeld

Fi

HØGGER PÅ
UTSETJINGSPUNKT
C/C RØYRGATE
RØYRDIAM. = Ø900
PUNKTNUMMER



Terrengprofil inntak M = 1:500



Rev.	Ant.	Revidertingen gjeld	Sign.
CLEMENS KRAFT		Dat. 26.02.2013	
PB. 535 SENTRUM, 0105 OSLO		Tegn. SAD	
Væla kraftverk		Kont. AF	
Vertikalprofil røyrgate		Prosj. 12117	
Bystøl als		Mål 1:1500	
R&S AS Topplassveier 10		Format A1	
www.bystol.no		Tegn.Nr. 110	
R&S AS Topplassveier 10		Rev.	

DOKUMENTASJONSTEGNING
ARBEIDSTEGNING
ANBUJSTEGNING
FØREBELS TEGNING

Vedlegg 5 Testrapporter mekaniske egenskaper
PU-skum fra Covestro

TEST RESULTS FROM BAYER MATERIALSCIENCE

Purpose:	Trial with cavity filling PU foam in a small scale trench
PU-system:	Baytherm® CX-45-C-125/W
Customer:	Odelskraft
Production date:	16.02.2015 (Lab. in Randers)
Tested by:	Thor Iversen/Jeannette Sund

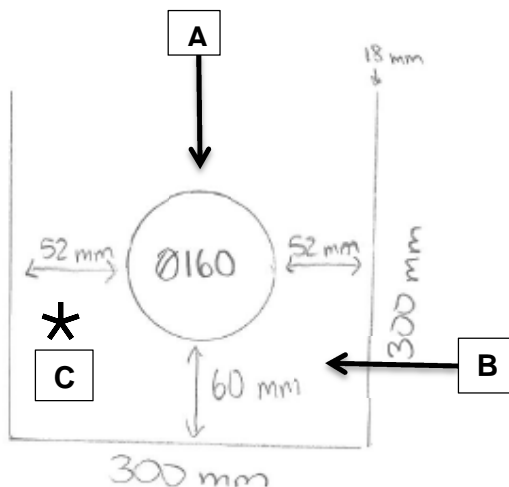
PROCES DATA

Polyol system:	Baytherm® CX-45-C-125/W		
Isocyanate:	Desmodur 44V20L		
Blowing agent:	Water (CO ₂)		
Mixing ratio:	ISO/POL:	125/100	[L/L]
Temperature on raw materials:	ISO/POL:	≈20/20	[°C]
Temperature in lab.:		22	[°C]
Machine data:	Lab. agitator running 3000 rpm		

Test specimen:

A small scale test trench was constructed for making lab. trials with a cavity filling method.
Dimensions of the trench:

Trench width: 300 mm
Pipe Ø: 160 mm
Angle: 20.4°



- Direction A: Samples tested in the direction as the arrow
- Direction B: Samples tested in the direction as the arrow
- Direction C: Samples tested in the pipe direction

Photos of the foamed trench:



Rise
direction



Property:		Unit:
Core density: According to principles in EN 1602.	48,1 47,8 47,6 49,0 48,0 48,9 48,1 48,5 48,7 Average: Standard Deviation	[g/L]
Compressive strength: According to principles In EN 826.	Direction A: Direction B: Direction C: Tot. Average: SD:	365/357/360 156/211/166 271/288/245 269 81,5
E-module, Compress According to principles in EN 826.	Direction A: Direction B: Direction C: Tot. Average: SD:	10,2/10,8/10,4 3,4/5,2/3,8 7,0/7,3/6,6 7,2 2,8

Tensile strength:		
According to principals in EN 1607.		
Direction A:	369/283/326	[kPa]
Direction B:	380/385/342	
Direction C:	364/366/359	
Tot. Average: SD:	353 32	
E-module_{tensile}		
According to principals in EN 1607.		
Direction A:	9,7/9,9/12,7	[MPa]
Direction B:	13,9/7,3/6,1	
Direction C:	11,2/7,8/12,5	
Tot. Average: SD:	10,1 2,7	

Comments:

Density distribution: The density distribution is very uniform.

Compressive strength: The compressive strength is good and at the expected level for the measured density level at position A and C. The compressive strength is significantly lower when measured perpendicular to rise direction. It is because the cells gets elongated (egg shaped) thus having a higher strength when pressing on the top of the cell than on the sides of the elongated cell. The level can be increased by increasing density.

Tensile strength: The tensile strength is good and at the expected level for the measured density level.

Conclusion

Baymer® CX-45-C-125/W has been tested in a downscaled test trench. This trial was made to verify whether the trench could be filled with a cavity filling system. From the results in the downscaled trench it looks like it could be a set-up that should be further investigated.

Baymer® CX-45-C-125/W is our standard cavity filling system containing flame retardants. The flame retardant is eliminated in the next version. We have also made further developments on the catalyst side in order to minimize potential leaching of amine from the foam. We don't expect these changes will have measurable impact on the physical properties.

Best regards, Jeannette Sund/Project Manager

"This data is provided to you in good faith. But no warranty or guarantee is made as to the accuracy or completeness of any data or statements contained herein. These data and statements are offered only for your own consideration, investigation and verification and are subject to change without notice.

The manner in which you use and the purpose to which you put and utilize our products, technical assistance and information (whether verbal, written or by way of production evaluations), including any suggested formulations and recommendations, are beyond our control. Therefore, it is imperative that you test our products, technical assistance and information to determine to your own satisfaction whether they are suitable for your intended uses and applications. This application-specific analysis must at least include testing to determine suitability from a technical as well as health, safety and environmental standpoint. Such testing has not necessarily been done by us.

It is expressly understood and agreed that you assume and hereby expressly release us from all liability, in tort, contract or otherwise, incurred in connection with the use of our products, technical assistance and information. Any statement or recommendation not contained herein is unauthorized and shall not bind us. Nothing herein shall be construed as a recommendation to use any product in conflict with patents covering any material or its use. No license is implied or in fact granted under the claims of any patent.

Unless specified to the contrary, the property values given have been established on standardized test specimens at room temperature. The figures should be regarded as typical values only and not as binding limiting values."

TEST RESULTS FROM BAYER MATERIALSCIENCE

Purpose:	Trial with spray foam in a full scale trench
PU-system:	Baytherm® SP-42-E-9/W
Customer:	Odelskraft
Production date:	10.02.2015 (Mjøndalen, Norway)
Tested by:	Thor Iversen/Jeannette Sund

PROCES DATA

Polyol system:	Baytherm® SP-42-E-9/W		
Isocyanate:	Desmodur 44V20L		
Blowing agent:	Water (CO ₂)		
Mixing ratio:	ISO/POL:	100/100	[L/L]
Temperature on raw materials:	ISO/POL:	≈65/65	[°C]
Temperature in the tent:	2 - 9 [°C]		
Mixing pressure:	ISO/POL:	≈77/84	[bar]
Machine data:	Graco HFR Fusion AP spray gun		

Test specimens:

- I. PU sprayed in a cardboard box. Height of layers approx... 20-30 mm. It was sprayed with the Graco HFR during the trial in Mjøndalen, Norway.



- PU sprayed on the ground as the pipe pillow at the trial in Norway. The height of the layers is very low approx... 10 mm.

Photo of the full scale trench in Mjøndalen:



Test Results			
Property:	I. Spray with height of layers 20-30 mm Sprayed in a cardboard box	2. Spray with height of layers 10 mm Sprayed on the ground as the pillow for the pipe	Unit:
<u>Core density:</u> According to principles in EN 1602.			
	58,3	60,4	[g/L]
	52,9	77,4	
	53,5	65,0	
	50,9	61,6	
	52,4	64,4	
	56,3	74,3	
	49,6		
	51,8		
	45,7		
	52,1		
Average:	52,4	67,2	
Standard Deviation:	3,5	7	



<u>Compressive strength:</u> According to principles In EN 826. - parallel to rise direction: - perpendicular to rise direction : Tot. Average: SD:	244/251/202/225/202 187/182/188/147/176 200 31,9	317/473/392 276/326/457 374 80,2	[kPa]
<u>E-module,Compress</u> According to principles in EN 826. - parallel to rise direction: - perpendicular to rise direction : Tot. Average: SD:	8,2/8,0/7,0/6,9/7,4 5,4/5,3/5,0/4,1/4,7 6,2 1,5	-/12,8/16,8 7,6/8,3/13,2 11,7 3,8	[MPa]
<u>Tensile strength:</u> According to principals in EN 1607. - parallel to rise direction: - perpendicular to rise direction : Tot. Average: SD:	378/294/355 299/301/279 318 39,1		[kPa]
<u>E-module,tensile</u> According to principles in EN 1607. - parallel to rise direction: - perpendicular to rise direction : Tot. Average: SD:	11,4/12,3/13,5 8,7/9,6/8,3 10,6 2,1		[MPa]

Comments:

Density distribution: The density is very dependent of the height of layers. The thin layers in sample #2 give a higher density and the thicker layers in sample #1 give a lower density. Another factor influencing the density is the cold ground. The layers sprayed direct on cold surface will also give significant higher density.

Compressive strength: The compressive strength is good and at the expected level for the measured density level. The compressive strength is significantly higher in the rise direction compared to perpendicular to the rise direction. This anisotropic nature is normal for sprayed PU foam. It is because the cells gets elongated (egg shaped) thus having a higher strength when pressing on the top of the cell than on the sides of the elongated cell. One of the measurements drops to 147 MPa and that is because the height of the layers in this sample is too high – the cells than gets too elongated and the foam loses strength.

Tensile strength: The tensile strength is good and at the expected level for the measured density level. Here the elongated cells are also visible – like for the compressive strength. The break in the foam is seen between the layers where the density is lowest and not between the layers. This shows that the adhesion between the layers is optimal and not influenced by the low ambient temperature in the tent.

Conclusion

Baytherm® SP-42-E-9/W has been tested in a full scale trench in Mjøndalen, Norway. The trench was placed in a heated tent.

The results of all tested foam properties look very good and show that the foam has good mechanical properties. The results show that the height of the layers has a great influence on the foam properties. If the layers are thin the density is very high thus giving a large consumption of PU for filling the trench. If the layers are too high the physical properties drop and the foam gets soft. It requires practice to be able to do a good spray job.

Baytherm® SP-42-E-9/W is not the final version of the spray system. We have made further developments on the catalyst side in order to minimize potential leaching of amine from the foam. We don't expect these changes will have measurable impact on the physical properties.

Best regards, Jeannette Sund/Project Manager

"This data is provided to you in good faith. But no warranty or guarantee is made as to the accuracy or completeness of any data or statements contained herein. These data and statements are offered only for your own consideration, investigation and verification and are subject to change without notice.

The manner in which you use and the purpose to which you put and utilize our products, technical assistance and information (whether verbal, written or by way of production evaluations), including any suggested formulations and recommendations, are beyond our control. Therefore, it is imperative that you test our products, technical assistance and information to determine to your own satisfaction whether they are suitable for your intended uses and applications. This application-specific analysis must at least include testing to determine suitability from a technical as well as health, safety and environmental standpoint. Such testing has not necessarily been done by us.

It is expressly understood and agreed that you assume and hereby expressly release us from all liability, in tort, contract or otherwise, incurred in connection with the use of our products, technical assistance and information. Any statement or recommendation not contained herein is unauthorized and shall not bind us. Nothing herein shall be construed as a recommendation to use any product in conflict with patents covering any material or its use. No license is implied or in fact granted under the claims of any patent.

Unless specified to the contrary, the property values given have been established on standardized test specimens at room temperature. The figures should be regarded as typical values only and not as binding limiting values."
