

Forankring av bend på rørgater med PU-skum

Stian Lønbø Aaker

Master i Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Leif Lia, IBM

Medveileder: Tor Oxhøvd Svalesen, Statkraft Energi AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



MASTEROPPGÅVE

Student: *STIAN LØBØ AAKER*

Tittel: **FORANKRING AV BEND PÅ RØYRGATER MED PU-SKUM**

1 BAKGRUNN

Bruk av nedgrovne røyrarter som vassveg til kraftverk har auka kraftig i samband med bygging av småkraftverk dei siste ti åra. Dei fleste småkraftverka har heilt eller delvis vassvegen som nedgrovne røyrarter, og løysingane utviklar seg vidare. Sidan 2001 er det fullført over 300 nye småkraftverk i Noreg, medan det siste fem år har blitt bygd over 30 per år. I samband med ei stor bunke med konsesjonssøknadar i NVE og vedtatt utbygging av 13,2 TWh ny kraftproduksjon innan 2020, vil det truleg bli bygd 30 – 50 småkraftverk kvart år framover i perioden 2016 – 2021.

Bruk av PU-skum som omfyllingsmasse mellom røyr og grøftevegg vart introdusert av oppfinnaren Guy Harris i 2014. Metoden vart utprøvd i pilotforsøk og med laboratorieforsøk i 2015 og i løpet av sommaren 2016 er det bygd 300 m med skumlagt røyrarter for Lille Måsevann pumpe i Adamselv i Finnmark. Ulike leggeprinsipp og metoden generelt vart studert gjennom studentarbeid og rapportert i to prosjektoppgåver på NTNU i 2016.

Utviklinga av PU-skum som omfyllingsmasse er støtta av ENOVA og det er viktig at denne metoden og kunnskapen vert publisert til alle som kan tenke seg å ta den i bruk.

2 STATUS FOR METODEN

I løpet av sommar og haust 2016 vart det prøvd ut tri ulike leggemetodar for skum mot GRP-røyr; a) Lukka form, b) forskaling (open og lukka) og til slutt c) direkte påføring på røyret. Dei tri ulike metodane har heilt ulik arbeidsmetodikk og det viser seg også at både kvalitet og struktur i skummet vert ulik. I tillegg vart det lagt to bend i PU-skum der i prinsippet skummet skal ta alle bend-kreftene.

Røyrigata vart trykksett i desember med avlesing av både eventuelle lekkasjar og deformasjonar i eitt bend. Det er samla inn data frå deformasjonane, men data er i liten grad analysert og tolka. For at metoden skal sertifiserast for å kunne ta bendkrefter er det nødvendig med omfattande testar av bruddlastar i bend. Dette er ikkje utført systematisk tidlegare.

Metoden er enno ikkje publisert internasjonalt og det er ønskeleg både frå initiativtakarane og frå dei som har støtta utviklinga økonomisk at metodar og prinsipp vert publisert. Derfor skal det skrivast ein internasjonal konferanseartikkel som ein del av oppgåva.

2 HOVUDPUNKT I OPPGÅVA

Arbeidet med masteroppgåva vil innehalde følgjande hovudpunkt:

- Måling og vurdering av deformasjonar og rørsle i bend på røyrigata til Lille Måsevann som vart bygd i 2016.
- Utvikling og bygging av ein testrigg for skalaforsøk av bend i laboratoriet.
- gjennomføring av testar med kraftopptak i bend.
- Testing av heft mellom skum og røyr i laboratoriet, med variasjon i parametarar som røyrtipe, temperatur, overflate, priming m.fl.
- Utarbeiding av retningslinjer for bygging av bend forankra med PU-skum

Innhaldet i masteroppgåva vil bli nærmare avgjort av rettleiar på basis av informasjon som kjem fram etter kvart som arbeidet går framover. Det er lagt opp til eit omfattande samarbeid med masterstudent Nina Johnsen, men det skal leverast separate masteroppgåver for kvar student.

3 RETTLEIING, DATA OG INFORMASJON

Formell rettleiar vil vere Leif Lia på NTNU og Tor Oxhøvd Svalesen i Statkraft vil vere medrettleiarar. Personar i firma Penstock BV, Fjellbygg, NVE, skum- og røyrleverandørar m.fl. vil vere nyttige som samarbeidspartnarar.

4 RAPPORTFORMAT, REFERANSAR OG ERKLÆRING

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osv. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5-format som .pdf i DAIM og trykkast i tre eksemplar som 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 den leveringsfristen som kjem fram i DAIM (20 veker + offentlege fridagar vårsemesteret).

Trondheim, 16. januar 2017

Leif Lia

Professor

Sammendrag

De siste årene har fallet i strømpris ført til at flere konsesjonssøkte småkraftverk nå vurderes som ulønnsomme. Tross utviklingen bygges det i dag ut omkring 30 – 40 småkraftverk i året og det vil trolig holde seg stabilt frem til utgangen av el – seritifikatordningen i 2021. Dagens metode med nedgravde rør benytter pukk/grus som omfyllingsmasse og bend forankres med betongklosser. Småkraftverkene ligger gjerne i utilgjengelige strøk utenfor allfarvei, materialene kan da være kostbare grunnet lang transport og siste del må ofte gjøres med helikopter. En innovativ metode ble i 2014 utviklet av Penstock BV der pukk/grus erstattes med polyuretanskum (PU-skum) som omfyllingsmasse rundt rørgata. I tillegg kan bend forankres med skummet uten bruk av betongklosser. Statkraft Energi As satte sommeren 2016 i gang utbyggingen av Lille Måsevann pumpestasjon i Finnmark. Prosjektet ble benyttet som en fullskala feltutprøving med bruk av PU-skum som omfyllingsmasse og til forankring av bend. Omtrent 300 m ble lagt med PU-skum som omfyllingsmasse inkludert to bend.

Metoden viser lovende resultater i felt, men prosjektet belyste flere utfordringer som må undersøkes videre. Denne oppgaven tar hovedsakelig utgangspunkt i to av utfordringene – forankring av bend med PU-skum og heft til rør. Det ble utført tre forsøk, deformasjonsmåling av skumlagt bend i felt, heft til rør og forsøk på bruddlast i skumlagt bend i laboratorium.

Et av bendene ved Lille Måsevann pumpestasjon ble instrumentert med ekstensometre. To separate målinger ble utført med seks måneders mellomrom. Resultatene fra målingene viser like verdier av deformasjoner ved maksimal last. Det aktuelle bendet har forflyttet seg 0,2 mm i aksial retning. De målte deformasjonene tyder på at skummet kun tar opp en liten andel av kreftene i bendet. Dette tyder på en overkapasitet og tillagt sikkerhet i skumlagte bend som ikke tas med i dimensjonering og planlegging.

Forsøk av heftkapasitet (τ) mellom rør og skum er utført med endring i parameterne overflatetemperatur på røroverflaten, herdetid, rørtype og pussing av rør. Herdetiden til skummet og temperaturen på røroverflaten har størst innvirkning på heftkapasiteten. Skum lagt ved rørtemperatur på 22 °C med herdetid 14 døgn gir heftkapasitet $\tau = 182$ kPa. Oppvarming av røroverflaten til >40 °C og herdetid en time gir umiddelbar økning i heftkapasitet $\tau = 171$ kPa.

Systematiske tester av bruddlast ble utført i Vassdragslaboratoriet på NTNU. Det er testet bruddlast i bend med ulike skumtværssnitt og bendvinkel. Totalt 11 forsøk er utført. Resultater fra forsøkene viser at økt skumtværssnitt og bendvinkel gir større kapasitet i skumlagte bend.

Forankring av bend med PU-skum vurderes som et godt alternativ til tradisjonell forankring med betongkloss. Det forutsetter derimot at utførende har god kunnskap om PU-skum og dens begrensninger i felt.

Abstract

The drop in electricity prices in recent years has led to many unprofitable small hydropower projects. Despite the development about 30 – 40 small hydropower projects are built each year. It is expected that this will go on until 2021, when the electricity certificate arrangement expires. Today's buried penstocks utilizes gravel/crushed rock as backfill and bends are anchored using concrete thrust blocks. The small hydropower plants are often located in remote areas. Therefore, materials can be costly due to long transport and helicopter frequently needs to be used for the last part. An innovative method was in 2014 developed by Penstock BV where gravel/crushed rock is replaced with polyurethane foam (PU-foam) as backfill around the penstock. In addition, the bends can be anchored with PU-foam without using concrete thrust blocks. Statkraft Energy AS initiated the project Lille Måsevang pumping station in Finnmark. The project was used as a full-scale test site for the use PU-foam as backfill in buried penstocks and for anchoring of bends. About 300 m of the penstock, including two bends, were enveloped in foam.

The method showed promising results in the field, but the project highlighted several challenges that needed to be investigated further. This thesis mainly focuses on two of the challenges – anchoring of bends with PU-foam and adhesion between foam and pipe. Three tests has been conducted, deformation measurements of foamed bend in the field, adhesion to pipe and scale test of failure loads in foamed bends.

Extensometers was installed at one of the bends at Lille Måsevang pumping station to monitor the displacement over time. Two separate measurements were conducted six months apart. Results from the measurements show similar values of displacement at maximum load. The bend moved 0.2 mm in the axial direction. The measured values implicate that the foam itself only distribute a small portion of the forces. This suggest that there is an excess capacity and extra security in bends anchored with PU-foam, which is not taken into account in dimensioning and planning.

Tests of adhesion capacity (τ) between pipe and foam has been conducted by changing parameters such as surface temperature of the pipe, curing time, type of pipe and sandblasted GRP-pipe. The curing time and surface temperature of the pipe has greatest effect on adhesion capacity. Foam placed at a surface temperature of 22 °C with a curing time of 14 days yields an adhesion capacity $\tau = 182$ kPa. Heating the pipe to surface temperature above 40 °C and curing the foam for one hour give an adhesion capacity $\tau = 171$ kPa.

Systematic tests of failure loads has been conducted in Vassdragslaboratoriet at NTNU. The tests consists of failure loads with different foamed cross-sections and bend angles. In total, 11 tests were conducted. The tests demonstrate that increased foam cross-section and bend angle increase the capacity in bends anchored with PU-foam.

Anchoring of bends with PU-foam is considered as a good alternative to traditional anchoring with concrete thrust block. However, it is key that the contractor has good knowledge of PU-foam and its limitation in the field.

Forord

Denne oppgaven er undertegnedes avsluttende oppgave ved det toårige masterstudiet bygg- og miljøteknikk ved Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) i Trondheim. Arbeidet med oppgaven er utført i løpet av våren 2017, mens en del av datagrunnlaget er innhentet i løpet av sommeren og vinteren 2016. Oppgaven er et samarbeid mellom Institutt for bygg- og miljøteknikk (IBM) og Statkraft Energi AS (Statkraft).

Lønnsomheten i vannkraftbransjen har falt kraftig de siste årene som følge av lavere strømpris, spesielt småkraftverk er berørt av fallet. Nye innovative metoder ved bygging av småkraftverk må drives frem for å holde utbyggingskostnadene nede. Bruk av PU-skum som omfyllingsmasse er en av alternativene som forskes på av NTNU, Statkraft og oppfinneren Guy Harris i Penstock BV. Sommeren 2016 valgte Statkraft å bygge ut Lille Måsevann pumpestasjon i Adamselv i Finnmark med PU-skum som omfyllingsmasse på deler av rørgata. Prosjektet er det eneste fullskala forsøket som benytter metoden. Enova var en stor bidragsyter til å få prosjektet gjennomført, en stor takk rettes til selskapet. Jeg var så heldig å få sommerjobb på prosjektet og tar med meg flere gode erfaringer derfra.

Det er mange personer og selskaper som skal takkes for deres bidrag i oppgaven. En spesiell takk rettes til professor Leif Lia (IBM) for stort engasjement og givende diskusjoner underveis i arbeidet med oppgaven. En stor takk går også til medveileder og prosjektleder ved Lille Måsevann pumpestasjon, Tor Oxhøvd Svalesen, for gode diskusjoner og god oppfølging under hele prosjektet.

Jeg vil også takke medstudent Nina Johnsen for godt samarbeid både gjennom masterperioden og under sommerjobb ved Lille Måsevann pumpestasjon.

Trondheim 11.06.2017

Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn for oppgaven.....	1
1.2	Metode.....	2
1.3	Artikkel og veileder for bruk av PU-skum.....	2
1.4	Oppgavens omfang.....	2
2	Gjeldende kunnskap ved forankring av bend.....	3
2.1	Regelverk for forankring av bend.....	3
2.2	Dagens praksis.....	3
2.3	Rørmaterialer.....	4
3	Polyuretanskum.....	9
3.1	Bestanddelene og kjemisk reaksjon.....	9
3.2	Materialegenskaper.....	11
3.3	Blanding av komponentene.....	19
3.4	Heft til rør.....	22
4	Krefter i bend.....	25
5	Lille Måsevann pumpestasjon.....	29
5.1	Målinger og analyse av deformasjon ved Lille Måsevann.....	30
5.2	Resultater.....	33
6	Forsøk av heft mellom skum og rør.....	37
6.1	Motivasjon.....	37
6.2	Oppsett av forsøk.....	37
6.3	Resultater.....	42
7	Skalaforsøk av bend i laboratorium.....	47
7.1	Motivasjon.....	47
7.2	Oppsett av forsøk.....	47
7.3	Resultater.....	52
8	Vurdering av PU-skum som forankring av bend.....	59
8.1	Overkapasitet i bend forankret med PU-skum.....	59
8.2	Vurdering av forsøksresultater.....	60
8.3	Økonomisk gevinst og regelverk.....	61
9	Konklusjon.....	63
9.1	Videre arbeid.....	63

10 Kilder	65
Vedleggsliste.....	69

Figurliste

Figur 1: Prinsipp av PU-skum som omfyllingsmasse.....	1
Figur 2: Dobbeltmuffe (NPG Norge, 2011).....	5
Figur 3: Mikrostruktur a) duktilt støpejern b) støpejern (Dipra, 2017)	6
Figur 4: Ulike løsninger av muffeskjøter til duktile støpejernsrør (Saint-Gobain, 2007)	6
Figur 5: Strekkfaste bend med duktile støpejernsrør (Duktus, u.d.).....	7
Figur 6: Kjemisk reaksjon mellom isocyanate og polyol (Kapps & Buschkamp, 2004)	9
Figur 7: a) Ureagert PU-skum som blir sprøytet i forskaling b) PU-skum som har ekspandert og herdet.....	10
Figur 8: Resultater fra forsøk utført av Buzzi et al (2008). H _c betyr homogent skum.	12
Figur 9: Spenning- tøyningsdiagram på homogent skum med densitet 52 kg/m ³ (Buzzi et al., 2008)	13
Figur 10: Spenning – tøyningsdiagram for trykkfasthet (Svalesen, 2015).....	15
Figur 11: Spenning – tøyningsdiagram for strekkfasthet (Svalesen, 2015).....	16
Figur 12: Forholdet mellom densitet og trykkstyrke (Thimural, et al., 2008).....	17
Figur 13: Mengde vann som blåsemiddel som en funksjon av densitet (Thimural, et al., 2008)	18
Figur 14: Forenklet tegning av en enhetscelle med a) åpen cellestruktur b) lukket cellestruktur (Goods, et al., 1998).....	19
Figur 15: Blanding av PU-skum med håndmiksing i laboratorium.....	20
Figur 16: Prinsipptegning av en høytrykksmaskin (resirkuleringssystem) (Kapps & Buschkamp, 2004)	21
Figur 17: Blanding av komponentene ved sammenstøt (Maier, et al., 2004).....	21
Figur 18: a) Bildet er tatt før prøven knuses b) bildet er tatt etter at prøven er knust med håndkraft	23
Figur 19: Bendmuffe i GRP (YLE GmbH, 2017).....	25
Figur 20: Kraftopptak i skumlagt bend.....	26
Figur 21: Lokalisering av Lille Måsevann pumpestasjon.....	29
Figur 22: Rørgate lagt i skum ved Lille Måsevann.....	29
Figur 23: WA inductive displacement transducer (HBM, 2016).....	31
Figur 24: Prinsippskisse av Wheatstone målebro (Electronics Tutorial, u.d.).....	31
Figur 25: Plassering av stillingsgivere på bendet ved Lille Måsevann.....	32
Figur 26: a) Stillingsgiver 4 plasser på rør og muffe b) Stillingsgiver 4 beskyttet med PE rør	32
Figur 27: Datamaskin med loggestasjonen som ble benyttet til målinger ved Lille Måsevann	33
Figur 28: Deformasjonsmåling ved gjentatt fylling og tømning av rørgata, 24.11.16	34
Figur 29: Deformasjonsmålinger ved fylling av rørgata, 28.04.17.....	34
Figur 30: Deformasjonsmålinger ved tømning av rørgata, 28.04.17.....	35
Figur 31: Prinsippskisse av forsøksoppsett.....	37
Figur 32: Oppsett av forsøk på GRP-rør.....	38
Figur 33: Temperaturmåler Hobo UX120-014M. Målepunktene er under ductapen.	39
Figur 34: Oppveining av isocyanate (brun væske) og polyol (lys væske).....	40

Figur 35: Blanding av skum til forsøk. Til høyre i bildet er koppen med gjenværende isocyanate.....	41
Figur 36: Bilder tatt etter forsøk med rørtemperatur 22 °C a) lag med polyurea b) vedheftsbrudd etter forsøk	43
Figur 37: Heftkapasitet (τ) ved temperatur 22 °C.....	45
Figur 38: GRP-rør som ble benyttet i forsøkene, kuttet i 15 °.....	48
Figur 39: Prinsipptegning av forsøk for kraftopptak i bend.	49
Figur 40: Støpeform før støping av skum	50
Figur 41: Skum under herding	51
Figur 42: Oppsett av forsøk	51
Figur 43: Alder-styrke for PU-skum.....	52
Figur 44: PU-skums kapasitet ved ulike tverrsnitt.....	53
Figur 45: PU-skums kapasitet ved ulike bendvinkler	53
Figur 46: Varierende tverrsnitt i brudd med samme støpeform a) 15° bend b) 30° bend	54
Figur 47: Skum som har trengt inn i rør. a) forsøk 6 b) forsøk 9.....	55
Figur 48: Deformasjoner i forsøksbend, a) før start b) rett før brudd.....	57
Figur 49: Bruddforløpet til skumlagt bend, bildene er tatt med 0,5 sekunders mellomrom. a) før brudd b) etter brudd.....	57
Figur 50: Grensesjikt mellom skum og pukk under rørgata	59
Figur 51: Eksempel på metode for oppvarming av rør; overbygd telt og varmluft fra kokoverk	61
Figur 52: Konteiner med pumpeutstyr og beholdere med polyol og isocyanate	62

Tabelliste

Tabell 1: Skummets ulike faser under reaksjonen, fra (Kapps & Buschkamp, 2004).....	10
Tabell 2: Ulike typer skum og deres egenskaper, fra (Covestro datablad, 2016).....	11
Tabell 3: Resultater fra forsøk utført av Covestro (Svalesen, 2015)	14
Tabell 4: Resultater av trykkstyrke ved NTNU (Svalesen, 2015)	14
Tabell 5: Resultater av strekkstyrke ved NTNU (Svalesen, 2015).....	15
Tabell 6: Gjengivelse av resultater fra Covestro (Penstock BV, 2017) og Normet (Patel, 2016)	22
Tabell 7: Krefter som oppstår i rørbend (Guttormsen, 2016)	25
Tabell 8: Utførte forsøk og parametre	39
Tabell 9: Resultater av heft mellom skum og rør, ubehandlet.....	42
Tabell 10: Resultat av heft mellom rør og skum, røroverflate over 40 °C, ubehandlet rør	43
Tabell 11: Resultater av heft mellom skum og rør, pusset rør.....	44
Tabell 12: Heftkapasitet mellom rør og skum med herdetid over 2 døgn, og ubehandlet rør	44
Tabell 13: Beregning av nødvendig volum skum	50
Tabell 14: Målte tverrsnitt etter brudd	54
Tabell 15: Beregnede verdier av bendlast i bruddgrensetilstand.....	56

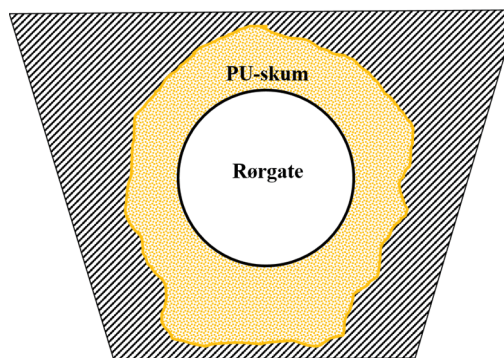
1 Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Flere småkraftverk ble gunstige å bygge ut etter innføringen av el-sertifikatordningen i 2012. Ordningen medførte kraftig økning i konsesjonssøknader hos NVE. De siste årene har fallet i strømpris ført til at flere av småkraftverkene blir vurdert som ulønnsomme. Tross utviklingen bygges det i dag ut omkring 30 – 40 småkraftverk i året og det vil trolig holde seg stabilt frem til utgangen av 2021.

Ved bygging av småkraftverk utgjør rørgate og forankring av bend omtrent 50 % av utbyggingskostnadene (Lia, 2017). Dagens metode med nedgravde rør benytter pukk/grus som omfyllingsmasse og bend forankres med betongklosser. Småkraftverkene ligger gjerne i utilgjengelige strøk utenfor allfarvei, materialene kan da være kostbare grunnet lang transport og siste del må ofte gjøres med helikopter. Forskning og utvikling av metoder som kan redusere tid og ressursbruk kan føre til at ulønnsomme kraftverk kan bli lønnsomme i fremtiden.

En innovativ metode ble i 2014 utviklet av Penstock BV der pukk/grus erstattes med polyuretanskum (heretter omtalt som PU-skum) som omfyllingsmasse rundt rørgata (figur 1). PU-skum er et materiale som gjennom en kjemisk reaksjon mellom polyol og isocyanate ekspanderer 20 – 30 ganger. Tanken bak metoden er å gi reduserte transportkostnader, samt redusert tidsbruk under bygging av rørgater med like god kvalitet som tradisjonell metode.



Figur 1: Prinsipp av PU-skum som omfyllingsmasse

I 2015 ble NTNU og Norsk Vannkraftsenter (NVKS) involvert i utviklingen av metoden gjennom masteroppgave utført av Svalesen (2015). Oppgaven inneholdt enkle verifikasjonstester av skummets styrke og motstand mot glidning i sjiktet PU-skum – pukk/grus. Forsøkene tydet på at skummets egenskaper gjør det mulig at PU-skum kan benyttes som omfyllingsmasse rundt rørgater og til forankring av bend.

Resultatene fra forsøkene var så lovende at Statkraft Energi AS satte i gang et fullskala forsøk sommeren 2016. Rørgata ved Lille Måsevann pumpestasjon (heretter omtalt som Lille Måsevann) er det første av sitt slag som benytter PU-skum som omfyllingsmasse. Prosjektet er lokalisert i Adamselv i Finnmark, og består av en pumpestasjon med tilhørende rørgate på 1130 m. Av den totale lengden på rørgata er omtrent 300 m inkludert to bend lagt med skum. Høsten 2016 ble to prosjektoppgaver skrevet ved NTNU som tar med erfaringer fra anlegget.

Metoden viser lovende resultater i felt, men prosjektet belyste flere utfordringer som må forskes videre på. Denne oppgaven tar hovedsakelig utgangspunkt i to av utfordringene – forankring av bend med PU-skum og heft til rør. I tillegg tar oppgaven med seg erfaringer som er opparbeidet gjennom arbeid ved Lille Måsevann.

1.2 Metode

Oppgaven tar utgangspunkt i tre ulike tester – måling av deformasjon på skumlagt bend ved Lille Måsevann, kraftopptak i skumlagte bend og heft mellom rør og skum.

Målinger av deformasjon på skumlagt bend ved Lille Måsevann gjøres direkte på pumpestasjonen, analysen av dataene utføres i Trondheim. Det teoretiske grunnlaget baseres på tidligere prosjektoppgave og masteroppgave om temaet.

Forsøkene med kraftopptak i skumlagte bend og heft mellom rør og skum utføres i Vassdragslaboratoriet på NTNU. Til forsøkene benyttes samme skumleverandør som er benyttet i tidligere forsøk og ved Lille Måsevann. Skummet produseres også med samme metode som i tidligere masteroppgave om PU-skum.

1.3 Artikkel og veileder for bruk av PU-skum

Initiativtakere til Lille Måsevann ønsker at en artikkel og en veileder som forklarer bruken av PU-skum i nedgravde rørgater skal utarbeides. Artikkelen publiseres trolig til konferansen Hydro 2017 i det internasjonale tidsskriftet for "Hydropower & dams". Både artikkel og veilederen skrevet i samarbeid med Nina Johnsen. En forklaring på eget bidrag vedlagt i vedlegg A. Artikkel og veileder ligger vedlagt i henholdsvis vedlegg B og C.

1.4 Oppgavens omfang

Oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng ved studieprogrammet Bygg- og miljøteknikk på NTNU. Dette tilsvarer en arbeidsmengde lik ett semester.

2 Gjeldende kunnskap ved forankring av bend

2.1 Regelverk for forankring av bend

Dagens lovverk for forankring av bend er gitt i forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften) § 5-15. som omhandler rør og tverrslagsporter. "Retningslinjer for stenge og tappeorganer, rør og tverrslagsporter" utgitt av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) utdyper bestemmelsene i § 5-15. Kapittel 6.4.2 beskriver regelverk for avvinkling i nedgravde rørgater.

Ved horisontale og vertikale retningsendringer i rørtraséen oppstår det bendkrefter som kan bli betydelige. Kravet er at rør skal ligge i ro uten deformasjoner. Ved bendkrefter større enn tillatt kan for eksempel rørene stabiliseres med betongfundamenter. (Elstad, et al., 2011, s. 25)

Fundament til forankring av bend skal etter damforskriften §5-15 dimensjoneres for:

- *Bruddgrensetilstand*
- *Ulykkesgrensetilstand*
- *Utmattingsgrensetilstand*
- *Bruksgrensetilstand*

Slik som retningslinjene er formulert gis det rom for andre forankringsmetoder enn bare betongfundamenter. PU-skum kan være en mulig metode til forankring av bend, dersom skummet oppfyller kravene satt av NVE.

2.2 Dagens praksis

Til forankring av bend i nedgravde rørgater benyttes vanligvis betongfundament eller fundamentplate. Strekkfaste skjøter kan også benyttes, men er lite brukt i bransjen. Dimensjonering av betongfundamenter er beskrevet i "Retningslinjer for stenge og tappeorganer, rør og tverrslagsporter" kapittel 6.3 (Elstad, et al., 2011). Stabilitet av forankringsfundamenter i betong beregnes som gravitasjonsdam med sikkerhet mot velting og glidning. Det skal legges til grunn karakteristiske laster ved beregning av stabilitet. Stabilitetsberegninger utføres ved å beregne sikkerhetsfaktor mellom summen av drivende og stabiliserende krefter.

$$S = \frac{\sum F_{stab}}{\sum F_{driv}} \quad (1)$$

Elstad, et al., (2011) beskriver kravene for stabilitet:

For velting gjelder:

I bruddgrensetilstand skal forholdet mellom stabiliserende og veltende moment minst være 1,4. I stabiliserende moment kan det regnes med virkning fra fjellbolter eller spennstag, og for spennstag gjelder at kontroll og etterspenning av spennlast er mulig. I ulykkesgrensetilstand skal forholdet mellom stabiliserende og veltende moment minst være 1,1. Virkning av fjellbolter og spennstag inngår.

For glidning gjelder:

I bruddgrensetilstand skal sikkerheten mot glidning minst være 1,4 og i

ulykkesgrensetilstand minst 1,1. I glidemotstanden kan medregnes friksjonskraften mellom sideflater og omkringliggende masser, inklusiv bruk av bolter eller spennstag. Ved nedgravde rør er det ikke tillatt å regne passivt jordtrykk mellom betongvegg og grøftevegg. Ved fundamentering på løsmasse gjennomføres en vurdering/kontroll av grunnforhold med tanke på bæreevne og fare for telehiv.

Regelverket er i all hovedsak bygget rundt forankring med betongfundamenter og derfor er noen krav ikke relevante for andre forankringsmetoder. For bend forankret med PU-skum er kravet til glidning mest relevant, da velting ikke er mulig med et kontinuerlig skumtvversnitt. Ettersom at PU-skum er et lett materiale ($45 \text{ kg/m}^3 - 120 \text{ kg/m}^3$) er det fare for oppdrift. Dette må tas hensyn til i beregninger av skumtvversnitt og overdekningsmasser. Som regel på småkraftverk blir det overskuddsmasser som kan benyttes til nedfylling av rørgata og bend dersom oppdrift blir et problem.

2.3 Rørmaterialer

Ved utbygning av nye rørgater er de mest benyttede rørtypene GRP- og duktile støpejernsrør, det benyttes også PE og spiralsveiste stålrør. Dersom PU-skum skal benyttes til forankring av bend er det viktig at skummet heftes til røret. GRP- og duktile støpejernsrør er mest aktuelt da de har best heftegenskaper av rørtypene. Oppgaven avgrenses til de to rørtypene.

2.3.1 GRP

GRP-rør, glassfiber reinforced plastic, ble først brukt på 1950-tallet, hovedsakelig innen kjemisk industri på grunn av materialets gode korrosjonsegenskaper (Mahmoud & Tantawi, 2007). I dag benyttes rørtypen til en rekke formål blant annet innen vannkraft, vannforsyning, olje og gass. Rørene produseres i dimensjoner fra 100 – 4000 mm, dimensjonen betegnes som rørets nominelle innvendige diameter (NPG Norge, 2011). Under produksjonen overflatebehandles røret med ulike typer belegg som harpiks eller polyester (Future Pipe Industries, 2017).

GRP-rør velges vanligvis for sin lave vekt, gode korrosjonsbestandighet og høye materialstyrke. Den lave vekten fører til billig transport og enkel håndtering på byggeplass. En av ulempene med rørtypen er sårbarheten mot punktlaster. Kravet til omfyllingsmasse er derfor strengere til GRP-rør enn til duktile støpejernsrør og PE-rør. PU-skum som omfyllingsmasse rundt rørgata fungerer som et beskyttende lag rundt GRP-rørene. Dermed er en av ulempene ved bruk av GRP-rør avverget. Kravene til omfyllingsmasse vil da ikke lenger være gjeldende og stedlige masser kan tilbakefylles rundt rørgata.

NPG Norge (2011) gir informasjon om produksjonsmetode av GRP-rør. Informasjonen og figurene i de påfølgende metodene er hentet fra læreboken:

a) Sentrifugalstøping (Hobas og C-tech)

En roterende form sørger for at kuttet glassfiber, sand/kalsiumkarbonat og polyester blir påført innvendig. Metoden gir begrenset trykkapasitet og benyttes derfor oftest til avløpsrør eller ved begrenset innvendig overtrykk.



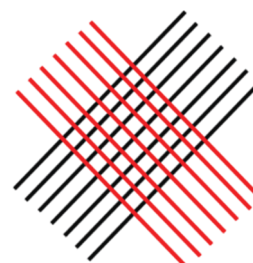
b) Kontinuerlig vikleprosess (Flowtite – Amiantit Norway)

Kontinuerlig glassfiberarmering legges i samme retning som hovedspenningene i røret. Hovedsakelig legges dette i omløpsretningen. Kuttet glassfiber, polyester og sand påføres tilfeldig. Alle materialer påføres utvendig. Metoden resulterer i høy trykkapasitet og derfor er rørene velegnet innen vannkraft.



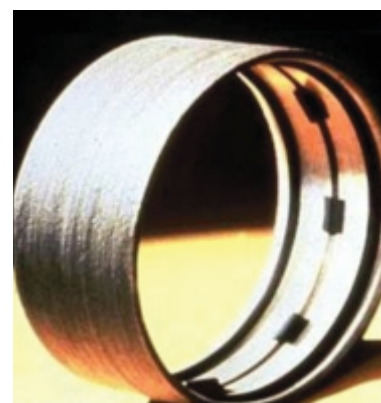
c) Kryssvikling (Sarplast og Ameron)

Metoden benytter en roterende kjerne til påføring av kontinuerlig glassfiber og polyester. Viklingene kan ha en akse mellom 45° og 88° relativ til røraksen. Metoden gir rør med god aksialstyrke og brukes derfor ofte innen industri, shipping, olje og gass.



Sammenkobling av rør

Ved sammenkobling av rørlengder benyttes ofte dobbeltmuffer (figur 2). Muffene leveres ferdig montert fra fabrikk. Muffa har to pakninger på hver side for å tette koblingen mellom rørene. I tillegg har muffa et senterregister slik at koblingen er sentrert på rørene, samt å sikre tilstrekkelig avstand mellom de spissede endene ved en eventuell ekspansjon (NPG Norge, 2011). Det tillates inntil 2 – 3 graders avvinkling i hver muffe, avhengig av valgt muffetype. De utadrettede kreftene som oppstår på grunn av avvinkling og trykk må tas opp gjennom friksjon mellom omfyllingsmasser og rør.

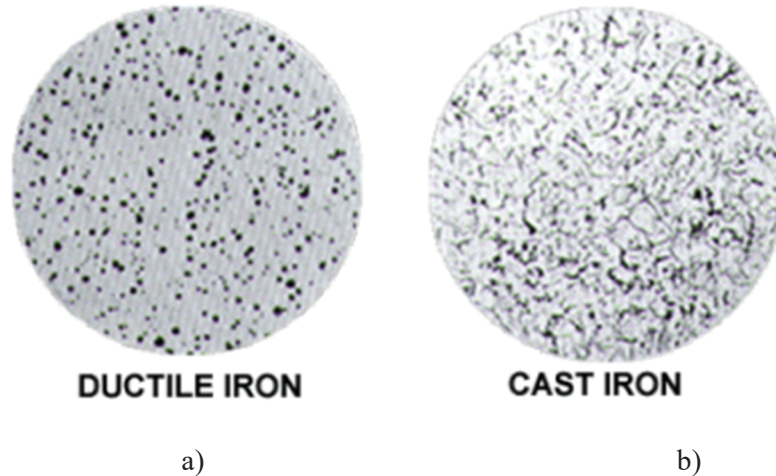


Figur 2: Dobbeltmuffe (NPG Norge, 2011)

Strekkfaste skjøter kan også benyttes, ved for eksempel strekkfaste koblinger. Men strekkfaste koblinger i GRP-rør har begrenset evne til å fordele strekkspenninger på grunn av materialets lave strekkstyrke. Med fordeling menes at materialet "tar opp" krefter uten varig deformasjon.

2.3.2 Duktile støpejernsrør

Støpejernsrør har blitt brukt i flere hundre år til transport av vann. I Versailles, Frankrike, ligger den eldste rørledningen av støpejern som fortsatt er i bruk i dag. Den ble installert i 1664 og har dermed fungert i over 350 år. Duktilt støpejern er en videreutvikling av støpejern som ble utviklet gjennom avansert metallurgi. Ved å tilsette kontrollerte mengder magnesium legering til smeltet jern endres mikrostrukturen. Karbonet i jernet forandrer form fra flak til kule (McWane ductile, 2017).

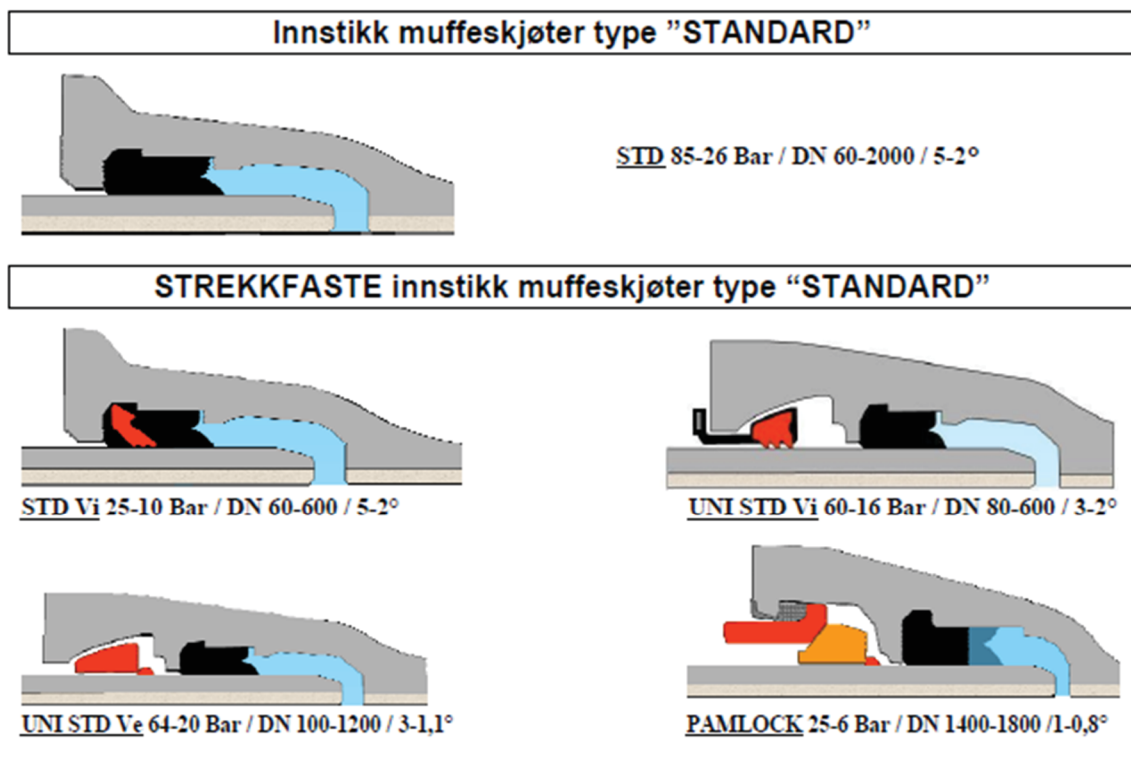


Figur 3: Mikrostruktur a) duktilt støpejern b) støpejern (Dipra, 2017)

Endringen i mikrostruktur fører til et materiale som er sterkere, seigere og duktilt. Duktile støpejernsrør har i tillegg god korrosjonsbestandighet og lang levetid (McWane ductile, 2017). Duktile støpejernsrør er tunge og fører derfor til kostbar transport og vanskelig håndtering på byggeplass. Ettersom røret er robust er behovet for PU-skum mindre enn ved for eksempel GRP-rør.

Sammenkobling av rør og bend

Sammenkobling av duktile støpejernsrør kan gjøres på flere måter. Ettersom materialet har gode egenskaper for strekkfasthet, E-modul og flytegrense tillates det at rør og rørforbindelser kan fordele krefter. Strekkfaste skjøter utnytter materialeegenskapene til duktile støpejernsrør.



Figur 4: Ulike løsninger av muffeskjøter til duktile støpejernsrør (Saint-Gobain, 2007)

Figur 4 viser ulike løsninger fra leverandøren Saint-Gobain med standard muffeskjøt og strekkfaste skjøter. Det er også verdt å merke at trykk, dimensjoner og avvinkling avgjør hvilken type skjøt som kan velges. Strekkfaste skjøter utføres med gripehode (STD Vi) eller med sveisehode (STD Ve). Dersom røret er på vei til å gli ut av muffa låses skjøten og spenninger settes opp direkte i rørmaterialet.



Figur 5: Strekkfaste bend med duktile støpejernsrør (Duktus, u.d.)

Rørprodusenten Duktus leverer løsninger for strekkfaste bend med duktile støpejernsrør (figur 5). De strekkfaste skjøtene holder røret sammen under påkjenning av vanntrykk. Utadrettede bendkrefter tas opp i selve rørmaterialet. Vannet trykker mot veggen i bendet tilsvarende det projiserte arealet av rørtverrsnittet. Bendet prøver å dra seg ut som følge av utadrettede kraften. Kraftene overføres til bendmuffa, før de igjen overføres som strekkspenninger i rørveggen i rettstreckene (Svalesen, 2015).

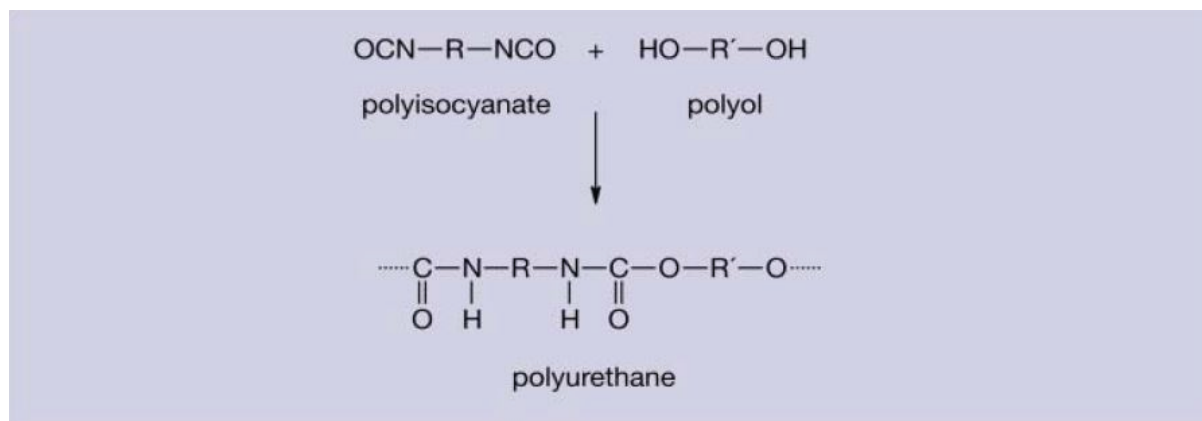
Dersom det ikke kreves strekkfaste egenskaper kan standard stikkuffe benyttes. Da settes en pakning i enden av røret før neste rør føres inn. Rørene ligger stabile i grøften på samme måte som for GRP-rør der de fastholdes av friksjonen mellom rør og jord. Da duktile støpejernsrør ikke er sårbare mot punktlaster kan det tillates større kornstørrelse enn ved bruk av GRP-rør.

I begge typer muffeskjøter er det klaring mellom rørene for å tillate utvidelse av røret ved temperaturendringer. Dersom rørene kommer i kontakt med hverandre kan det oppstå trykkspenninger med påfølgende utknekkning av rørgata.

3 Polyuretanskum

3.1 Bestanddeler og kjemisk reaksjon

Polyol og isocyanate er flytende komponenter som i kontakt med hverandre reagerer og danner polyuretanstrukturen i PU-skum (figur 6). Polyol er en samlebetegnelse på et alkohol med flere hydroxyl grupper (Covestro AG, 2016). Polyol benyttes til en rekke formål, men det skiller gjerne mellom to typer bruksområder, matteknologi og polymer kjemi. Isocyanate er et kjemikalie som inneholder minst en isocyanate gruppe (-NCO) i sin struktur. Isocyanater reagerer med kjemiske stoffer som inneholder en alkohol forbindelse (3M, 2008).



Figur 6: Kjemisk reaksjon mellom isocyanate og polyol (Kapps & Buschkamp, 2004)

I tillegg til polyol og isocyanate blandes det inn små mengder blåsemiddel for å få skummet til å ekspandere. Tidligere ble KFK gass benyttet som blåsemiddel, ettersom gassen er ulovlig, benyttes nå vann, hydrokarboner eller fluorhydrokarboner (Kapps & Buschkamp, 2004). Men vann er det mest anvendte blåsemiddelet på markedet da det gir god kvalitet og ingen utslipp av drivhusgasser. Vannet reagerer med isocyanat og som et biprodukt dannes polyurea og karbondioksid. Uten vann får skummet store åpne 'celler', dårlig kvalitet og det ekspanderes lite (Thimural, et al., 2008). Med en celle menes en gassfylt pore i skummet.

Under reaksjonen mellom komponentene foregår en eksoterm prosess der skummet gjennomgår en faseforandring som avgir varme (Pedersen, 2017). Temperaturen kan komme opp mot 180 °C i kjernen (Kapps & Buschkamp, 2004). Vannet fordamper som følge av temperaturen, og sammen med karbondioksid bidrar dampen til ekspansjon. Dersom skummet har mulighet til å ekspandere fritt, utvides det 20 - 30 ganger.

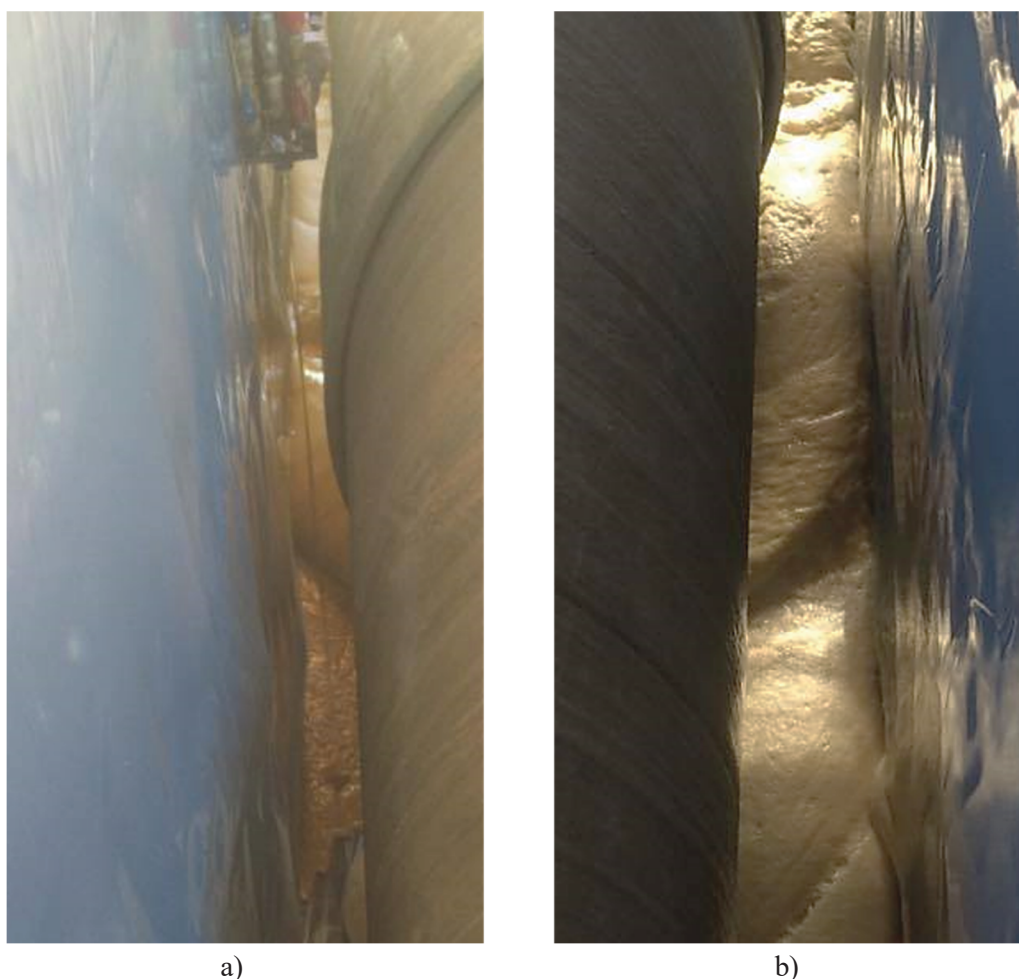
Skummet gjennomgår ulike faser under reaksjonen. Hvor lang tid fasene tar avhenger av skumtype, temperatur på komponentene, luftfuktighet og metode for blanding. Tilsetningsstoffer kan tilsettes for å akselerere reaksjons- og herdeprosessen. Tabell 1 gir informasjon om de forskjellige fasene.

Tabell 1: Skummets ulike faser under reaksjonen, fra (Kapps & Buschkamp, 2004)

Fase	Fase navn	Beskrivelse
1	Mixing	Blanding av komponentene
2	Creaming & foaming	Begynnelse av ekspansjon
3	Stirring/fibre	Overgang fra flytende til fast stoff
4	Tack free	Ekspansjonen sakner ned. Skummet er ikke lenger klebrig.
5	Gas release	Utslipp av overflødig gass i skummet

Skummet fortsetter å øke i styrke etter at de fem fasene er over, polyuretanreaksjonen kan pågå i 48 timer etter påføring. Når reaksjonen er fullført har skummet oppnådd full styrke. Imidlertid oppnår skummet 85 – 90 % styrke etter nedkjøling, som kan ta bare noen timer avhengig av skumtykkelse (Covestro, 2017).

I fase to forandres fargen på skummet fra mørk til lys. Endringen i farge er viktig for kvalitetskontrollen av ferdig herdet skum da mørk farge tyder på dårlig blandet skum. God kvalitet på PU-skum kjennetegnes av en homogen masse der fargen er lik gjennom hele materialet (Kapps & Buschkamp, 2004). I tillegg skal det ikke være åpne synlige celler eller hulrom i skummet (Johnsen, 2017).



Figur 7: a) Ureagert PU-skum som blir sprøytet i forskaling b) PU-skum som har ekspandert og herdet

Bildene i figur 7 er tatt med ti minutters mellomrom. Skummet i b) har fått en klar homogen kremaktig farge, som tyder på god kvalitet. Det ble heller ikke observert hulrom eller åpne synlige celler. Bildene er tatt under påføring av skum med åpen forskaling ved Lille Måsevann.

3.1.1 Blandingsforhold

På markedet i dag finnes flere leverandører og ulike typer skum, hovedsakelig deles det inn i to typer. I oppgaven betegnes typene skum som sprøyteskum og pour-skum. Med pour-skum menes skum med lang reaksjonstid som kan helles i en form eller forskaling før det herder. Sprøyteskum benyttes til direkte påføring på en overflate og reagerer i løpet av få sekunder. Til forankring av bend er påføring direkte på rør med sprøyteskum den mest anvendelige påføringsmetoden da den ikke krever forskaling. Det er verdt å merke at ulike leverandører kan dele opp i andre typer skum. Hovedegenskapene til sprøyte- og pour-skum er gjengitt i tabell 2, databladene er vedlagt i henholdsvis vedlegg D og E.

Tabell 2: Ulike typer skum og deres egenskaper, fra (Covestro datablad, 2016)

Type skum	Blandingsforhold etter vekt (ISO:POL)	Densitet* (g/l)	Reaksjonstid** (sekunder)
Sprøyte	1,12:1,00	43,5 ± 2	12 ± 4
Pour	1,43:1,00	47,5 ± 2	330 ± 30

*Temperatur på komponentene 21 °C ved håndmiksing

** Tid til skummet ikke lenger er klebrig (fase 4)

Hovedforskjellen mellom skumtypene er blandingsforholdet mellom isocyanate og polyol. Pour-skum krever en større andel isocyanate enn sprøyteskum. Det benyttes også polyol med ulike egenskaper i skumtypene. Blandingsforholdet og ulik type polyol har innvirkning på skummets reaksjonstid som tabell 2 viser. I tillegg til reaksjonstiden forandres også densitet, styrke og cellestruktur.

3.2 Materialeegenskaper

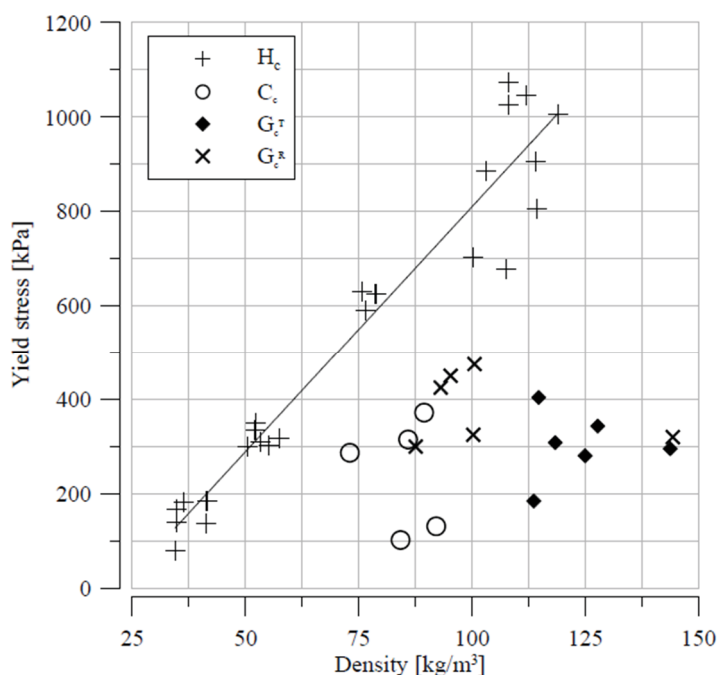
PU-skum er et anisotrop materiale. Det betyr at materialet har ulike mekaniske egenskaper avhengig av hvilken retning som undersøkes – størst styrke har skummet parallelt med heveretningen. Med heveretning menes retningen skummet ekspanderes. Materialets mekaniske egenskaper påvirkes av flere faktorer som blandingsforhold, temperatur på komponentene under påføring, luftfuktighet, mengde tilsatt vann som blåsemiddel, andre tilsetningsstoffer og heveretning. Graden av påvirkning varierer, men temperatur på komponentene under påføring og mengde tilsatt vann som blåsemiddel har størst påvirkning (Aaker, 2016).

3.2.1 Mekanisk styrke og elastisitetsmodul

PU-skum er et velprøvd materiale og det har blitt utført en rekke tester av styrke og E-modul til forskjellige skumtyper fra ulike leverandører. Under gjengis resultater fra forsøk utført av Buzzi et al (2008), Covestro (2015) og Svalesen (2015). Til forsøkene i denne oppgaven skal det benyttes pour-skum levert av Covestro, derfor er resultatene fra Covestro (2015) og Svalesen (2015) spesielt relevante.

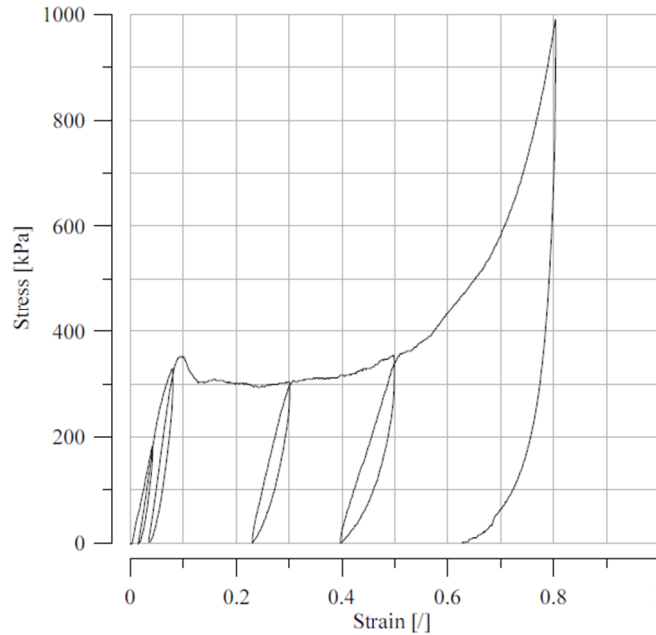
Forsøk utført av Buzzi et al.

Buzzi et al. (2008) har utført forsøk basert på 17 kilder. Bruken av skummet i forsøkene er rettet mot korreksjon av setninger i bakken. Skummet injiseres under eksisterende bygg og ekspansjonstrykket fra skummet fører til at bygget reises. I forsøkene benyttes skum fra selskapet Uretek med densitet fra 37 kg/m^3 – 145 kg/m^3 . Til sammenligning skal skummet levert av Covestro ha en minste densitet på 45 kg/m^3 . Både skum injisert i bakken og produsert i laboratorium er blitt testet. Skum injisert i bakken viser seg å være inhomogent da injiseringsmetoden ikke var god nok. Det fokuseres i denne oppgaven på skummet som er lagt i laboratorium, da det gir homogent skum (H_c).



Figur 8: Resultater fra forsøk utført av Buzzi et al (2008). H_c betyr homogent skum.

Resultatene i figur 8 viser trykkfasthet til skum med ulik densitet. Regresjonslinjen til prøvene gir en $R = 0.92$, det viser en god korrelasjon mellom skummets densitet og trykkstyrken. Det er kun utført enaksiale trykkforsøk i skummets heveretning.



Figur 9: Spenning- tøyningsdiagram på homogent skum med densitet 52 kg/m^3 (Buzzi et al., 2008)

Skummet har et lineært elastisk spenningsfordeling frem til 10 % tøyning. Etter den elastiske fasen får skummet plastisk fase og fastner kraftig etter 60 % tøyning. Ved tøyning på 60 % er det ikke mer luft igjen i materialet som kan presses ut og det er da selve skum materialet som presses sammen.

Forsøk utført i Mjøndalen og i laboratorium i Randers, Danmark

I 2015 utførte Covestro forsøk på PU-skum for selskapet Odelskraft, tidligere utvikler av metoden. Under forsøkene ble både pour-skum og sprøyteskum testet. Samtlige forsøk er i henhold til europeisk standard for testing av isolasjonsmateriale i bygninger; EN 1602 (densitet), EN 826 (trykkstryke og E-modul) og EN 1607 (strekstryke og E-modul). I rapportene som er vedlagt i vedlegg F gis resultatene med gjennomsnittlig styrke og E-modul med standardavvik (SD). Resultatene er gjengitt i Svalesen (2015). Tabell 3 viser resultatene fra forsøkene.

Tabell 3: Resultater fra forsøk utført av Covestro (Svalesen, 2015)

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

Forsøkene viser at styrken i sprøyteskummet avhenger av påføringsmetoden som er benyttet under forsøket. Forsøk 2 gir større trykkstyrke enn forsøk 1 med samme type skum. Det ble ikke utført forsøk av strekkapasitet på skumprøven i forsøk 2.

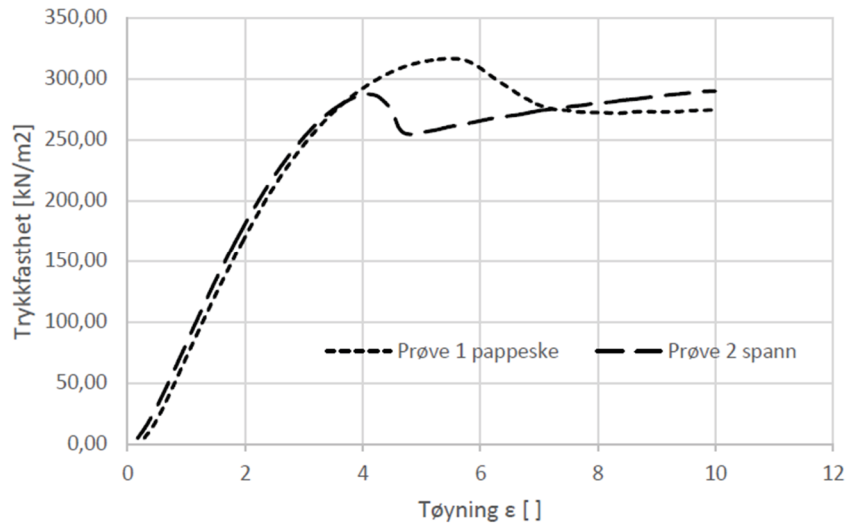
Forsøk utført ved Materialteknisk laboratorium på NTNU

I 2015 ble forsøk på skumstyrke og E-modul utført ved Materialteknisk laboratorium på NTNU. Forsøkene inneholdt både tester av strekk- og trykkstyrke og E-modul til pour-skum produsert i Materialteknisk laboratorium på NTNU. Skummet ble levert av Covestro og produsert sammen med representant fra selskapet. Forsøkene er ikke i henhold til europeisk standard for test av isolasjonsmateriale i bygninger, da forsøkene var ment å være enkle verifikasjonstester av skumstyrke. Resultatene i tabell 4 og 5 viser henholdsvis trykk- og strekkstyrke, hentet fra Svalesen (2015). Spenning – tøyingsdiagrammer ble og utarbeidet i forsøkene (figur 10 og 11).

Tabell 4: Resultater av trykkstyrke ved NTNU (Svalesen, 2015)

Nr.	E- modul ved 1% tøyning	Trykk- fasthet ved 1% tøyning	E- modul ved 2% tøyning	Trykk- fasthet ved 2% tøyning	E- modul ved 4% tøyning	Trykk- fasthet ved 4 % tøyning	Trykk- fasthet ved brudd	Last ved 10% defor- masjon
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 10: Spennings – tøyningsdiagram for trykkfasthet (Svalesen, 2015)

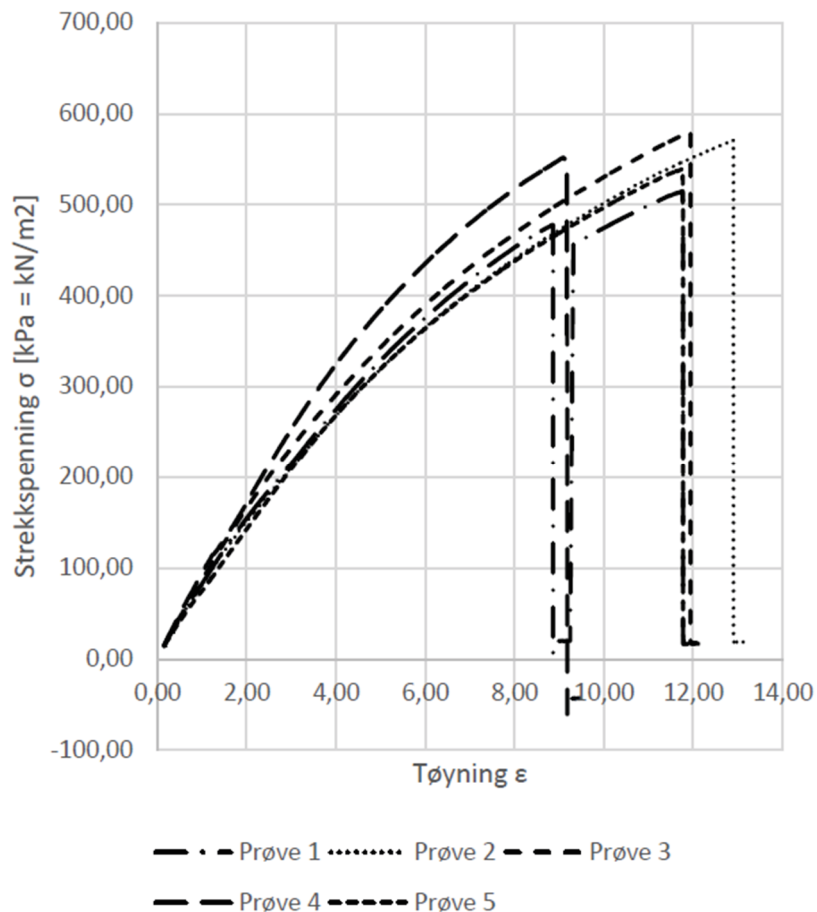
Under forsøkene ble skummet til trykktestene lagt på to ulike måter, en i pappeske og en i bøtte. Prøvene viser et elastisk spenningsforløp frem til ca 3% tøyning og en maksimal trykkfasthet ved ca 4 % (figur 10).

Tabell 5: Resultater av strekkstyrke ved NTNU (Svalesen, 2015)

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

Førsteamanuensis Arne Aalbert har følgende forklaring av større strekkstyrke, gjengitt i Svalesen (2015):

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.



Figur 11: Spenning – tøyingsdiagram for strekkfasthet (Svalesen, 2015)

Resultatene (figur 11) viser at skummet går til brudd ved relativ tøyning (ϵ) mellom 8,5 – 13 %. Dette betyr at materialet kan strekkes inntil 13 % av initial lengde før det går til brudd. Et prøvestykke med lengde 100 mm kan strekkes 13 mm før brudd forekommer. Resultatene i forsøket indikerer at materialet er elastisk, sammenlignet med for eksempel stål som når brudd ved tøyning 0,2 – 0,3 % (Berge, 2011).

E-modulen i et materiale beskriver forholdet mellom fasthet og forlengelse. Gjennomsnittlig E-modul for strekk i undersøkte prøvestykker er 4,86 mPa. Beregningene tar utgangspunkt i at hele tøyningen skjer i det innsnevrede feltet i prøvestykkene. Da deler av tøyningene skjer i materialet som holdes fast i maskinen må det knyttes noe usikkerhet til verdien for E-modul. Måling av deformasjoner i etterkant viser at prøvestykkene på 75 mm tøytes omtrent 9 mm, der 7 mm er elastisk og 2 mm er varig deformasjon (Svalesen, 2015).

3.2.2 Densitet

Skummets egenskaper er avhengig av densiteten. Thimural, et al. (2008) og Goods, et al. (1998) har undersøkt densitet av skum og koblet det opp mot styrken. I forsøkene er det henholdsvis testet densiteter mellom 42 kg/m^3 – 118 kg/m^3 og 120 kg/m^3 – 600 kg/m^3 . Resultatene tyder på at skummets styrke kan beskrives med en potenslov. En potenslov er vanlig innen statistikk og beskriver et eksponensielt forhold mellom to verdier. For eksempel kan arealet av et kvadrat

beskrives med hensyn på lengden av sidene, dersom lengden dobles blir arealet økt med en faktor på fire. Skummets styrke kan da beskrives som en eksponensiell funksjon av densiteten.

$$f_{pu} = k * \rho_{pu}^n \quad (2)$$

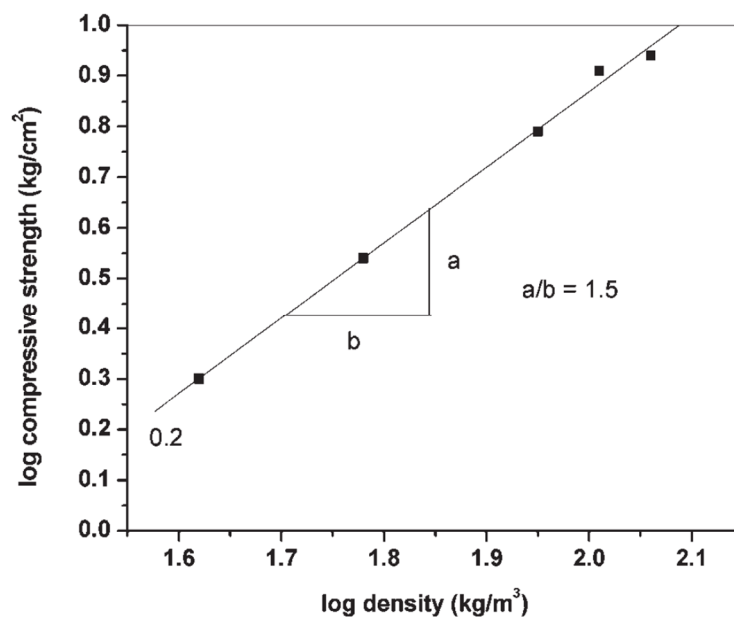
Hvor

f_{pu} – Skummets styrke

k – Korreksjonsfaktor for høy eller lav densitet (≈ 1)

ρ – Skummets densitet

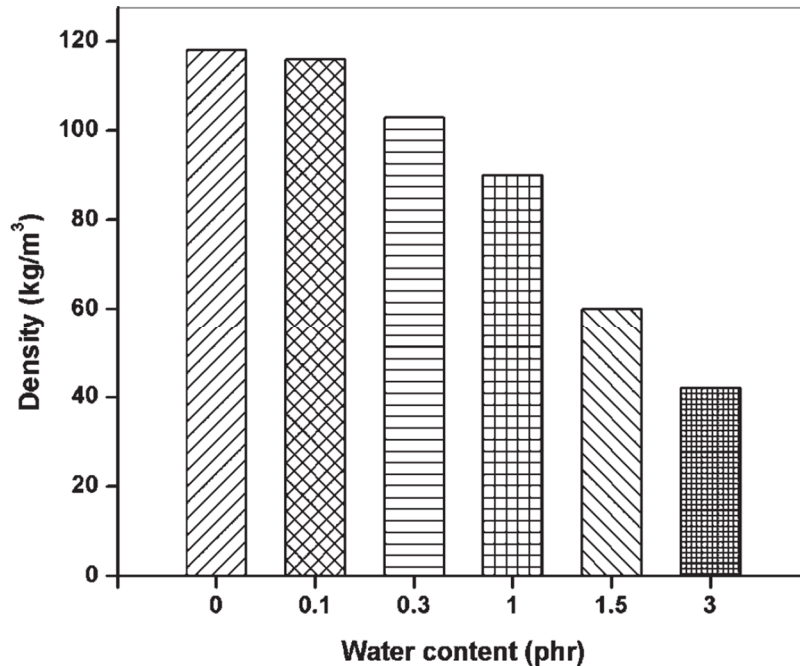
n – Eksponensielt forhold mellom skum og densitet



Figur 12: Forholdet mellom densitet og trykkstyrke (Thimural, et al., 2008)

Thimural, et al. (2008) fant i sine forsøk et eksponensielt forhold på 1,5 (figur 12). Dette er i tråd med andres funn der verdiene varierer mellom 1-2 (Thimural, et al., 2008). Goods, et al. (1998) fant i sine funn et forhold på 2,1, her er produsert skummet i en støpeform som gir kompakt skum med høy densitet, som kan være årsaken til noe høyere verdi.

Det er flere faktorer som påvirker densiteten til skummet – blandingsforhold, temperatur på komponentene, luftfuktighet, mengde blåsemiddel og tilgjengelig volum til å ekspandere. Thimural, et al. (2008) undersøkte i sine forsøk innvirkning mengde vann som blåsemiddel har på densiteten.

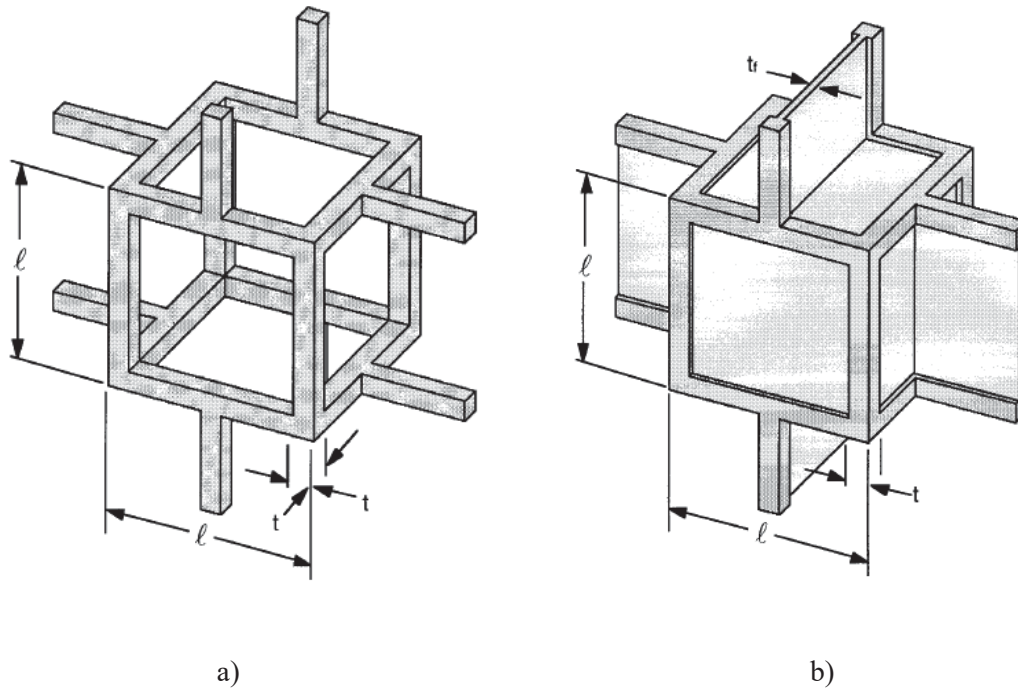


Figur 13: Mengde vann som blåsemiddel som en funksjon av densitet (Thimural, et al., 2008)

Dersom vann benyttes som blåsemiddel i skummet vil økt vannmengde føre til større ekspansjon og lavere densitet grunnet økt porevolum. Som figur 13 viser støttes dette av Thimural, et al. (2008). I figuren er vannmengden gitt som "parts per hundred of polyol by weight".

3.2.3 Cellestruktur

PU-skum omtales enten åpen celle eller lukket celle som refererer til hvordan cellestrukturen i skummet er bygget opp. I skum som har åpen cellestruktur er cellene sammenkoblet i hverandre uten en cellevegg mellom dem. Luft kan strømme fritt mellom cellene som gir et mykt skum. For eksempel skummadrasser har slike åpne celler. I skum med lukket cellestruktur er hver celle adskilt fra cellen ved siden av med en cellevegg. Som følge av at hver celle er forseglet blir gassen fra blåsemiddelet fanget i cellene.



Figur 14: Forenklet tegning av en enhetscelle med a) åpen cellestruktur b) lukket cellestruktur
(Goods, et al., 1998)

I PU-skum er ikke cellene firkantet, slik som vist i figur 14, men kuleformet da de blåses opp av gasstrykk. Figuren illustrerer likevel godt hvordan cellestrukturen er bygget opp. Det gir flere fordeler med lukket cellestruktur; økt styrke, redusert deformasjoner og vannabsorpsjon. Pour-skum omtales som lukket cellestruktur, der minst 90 % av cellene skal være lukket. Som omtalt av Aaker (2016) er cellestrukturen avhengig av kvaliteten på skummet. Det er dermed ikke absolutt at skummet har 90 % lukka celler.

3.3 Blanding av komponentene

Hovedsakelig benyttes to metoder for blanding av komponentene; håndmiksing og mekanisk blanding. Begge har fordeler og ulemper i forhold til mengde skum produsert og utstyr som kreves.

3.3.1 Håndmiksing

Metoden benyttes gjerne til fremstilling av små mengder skum i laboratorium. Komponentene veies opp hver for seg, før de blandes sammen med en drill. Det er vesentlig at drillen som benyttes har rotasjonshastighet over 3000 omdreininger per minutt, for å sørge for god kvalitet på ferdig blandet skum.



Figur 15: Blanding av PU-skum med håndmiksing i laboratorium

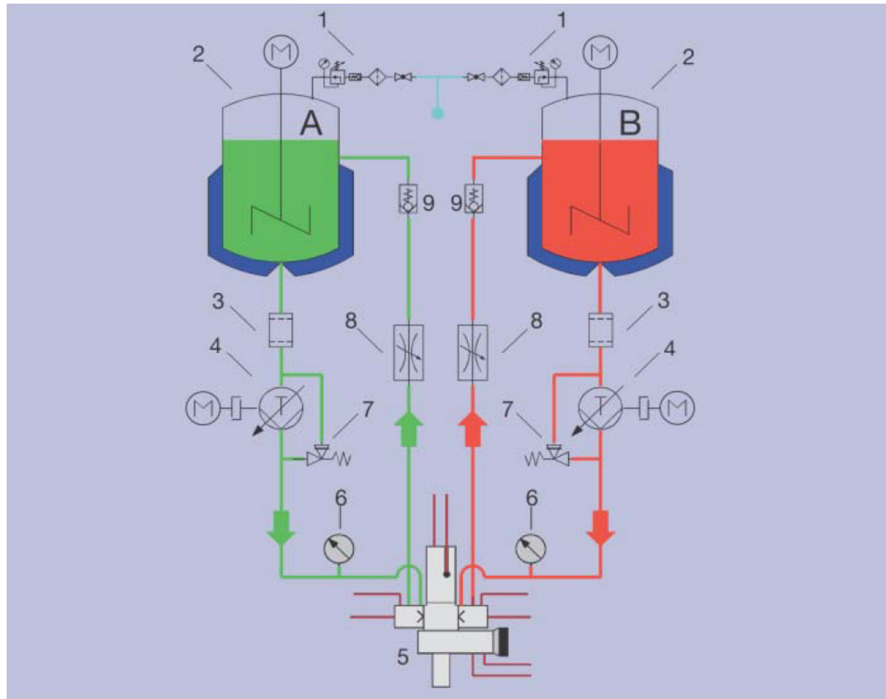
Ved håndmiksing er temperaturen av mindre betydning da omrøringen av komponentene ikke gjøres ved sammenstøt. Det anbefales fortsatt at skummet har en temperatur på over 23 °C (Kapps & Buschkamp, 2004). Skummets reaksjonstid har innvirkning på blandingens resultat. Skum med lang reaksjonstid er gunstig å bruke, da skummet ikke begynner å ekspandere før komponentene er blandet sammen. Dette gir også tid til å forflytte blandingen over i en form.

3.3.2 Mekanisk blanding

Mekanisk blanding benytter maskiner og trykk til å blande komponentene. Mekanisk blanding er mest anvendelig i felt da det kan produseres større mengder skum. Generelt skiller det mellom lavtrykks- og høytrykksmaskiner.

I lavtrykksmaskiner strømmer komponentene ved 3 – 40 bar og transporteres til et omrøringskammer ved hjelp av tannhjulspumper. Tidsinnstilte bryterventiler sørger for at komponentene entrer omrøringskammeret samtidig. Når et parti skum er produsert må kammeret skylles med vannholdig skyllemiddel for å fjerne gjenværende skumrester (Kapps & Buschkamp, 2004). Her produseres ikke skum kontinuerlig som tydelig reduserer produksjonskapasiteten.

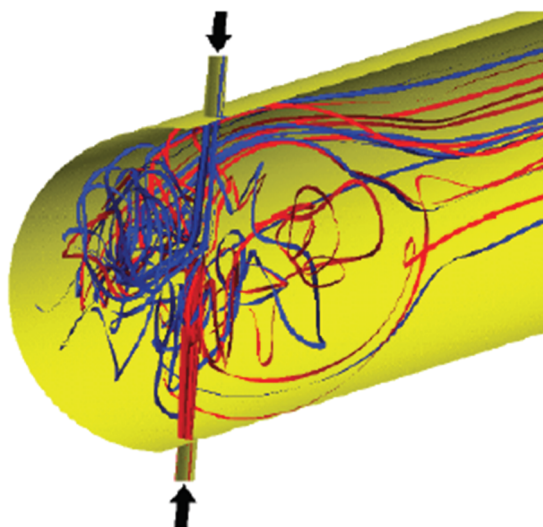
Resirkulasjonssystem er en moderne utgave av høytrykksystemer til blanding av skum. Her komprimeres komponentene til 150 – 300 bar og sendes fra sine lagringsenheter til en innsprøytingsdyse der de blandes. Dersom produksjonen stoppes sendes komponentene tilbake til sine lagringsenheter (Kapps & Buschkamp, 2004).



- | | | |
|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| | 1: Trykkavlastningsventil | 6: Manometer |
| A: Polyol | 2: Lagringsenhet | 7: Sikkerhetsventil |
| B: Polyisocyanate | 3: Filter | 8: Spjeld |
| | 4: Målepumpe | 9: Tilbakeslagsventil |
| | 5: Hydraulisk blandehode | |

Figur 16: Prinsipp tegning av en høytrykksmaskin (resirkuleringsystem) (Kapps & Buschkamp, 2004)

Presis gjennomstrømming og trykk justeres i pumpa for å gi korrekte mengder av komponentene. Blanding skjer ved sammenstøt i innsprøytningdysen der hastigheten på komponentene varierer fra 100 – 150 m/s (Maier, et al., 2004).



Figur 17: Blanding av komponentene ved sammenstøt (Maier, et al., 2004)

Kinetisk energi i væskene sørger for god blanding av komponentene (figur 17). Blanding ved kinetisk energi er mest brukt i moderne høytrykkssystemer da det gir god kvalitet og kontinuerlig produksjon av skum.

3.4 Heft til rør

Heft til rør er et uttrykk som beskriver hvilke krefter som må til for å rive et skumareal fra røret. Covestro har tidligere utført forsøk for Penstock BV, der heftkapasitet (τ) til GRP overflate ble undersøkt. Også Normet, leverandører av skum, har utført forsøk av heft til GRP overflater. Forsøksrapporten til Normet ligger vedlagt i vedlegg G. I tabell 6 gjengis resultatene fra forsøkene.

Tabell 6: Gjengivelse av resultater fra Covestro (Penstock BV, 2017) og Normet (Patel, 2016)

Utførende	Overflate	Overflatetemperatur [°C]	Resultat [kPa]
Covestro	GRP	22	300
Covestro	GRP	8	65
Normet	GRP	20 ± 2	800

Begge forsøkene er utført i laboratorium under kontrollerte forhold, der skummet trekkes normalt røret. Det vites ikke mer om utførelsen av forsøkene enn det som er gitt i kildene. I en rørgate og i et bend er heften aksialt på røret av interesse.

Svalesen (2015) nevner teoretiske heftkapasiteter (τ) mellom skum og rør, $\tau = 170$ kPa på GRP-rør og $\tau = 200$ kPa på duktile støpejernsrør. Det er her ikke nevnt noe om hverken overflatetemperatur på røret, hvilken retning kapasiteten virker i eller herdetid.

Heftkapasiteten kan beregnes ved å benytte formelen:

$$\tau = \frac{F_N}{A} \quad (3)$$

Hvor

τ – Heftkapasiteten i aksialretning [MPa]

F_N – Kraft i aksialretning [N]

A – Arealet mot røroverflaten [mm²]

Det er flere faktorer som påvirker heft mellom rør og skum. Røroverflaten må være fri for fett, olje og skitt (Kapps & Buschkamp, 2004). Røret må vaskes før påføring av skum kan begynne. Skummet vil òg reagere med vann og fukt tilstede som fører til ytterligere redusering av vedheft - derfor må røret også være tørt.

3.4.1 Polyurea

Polyurea er et fast stoff som dannes i PU-skummet dersom isocyanate kommer i kontakt med vann eller overflaten skummet påføres mot er for kald. Polyurea er sprøtt og heftes dårlig til overflater. Dannelsen av stoffet er årsaken til at skummet ikke kan påføres direkte på vann.



a)



b)

Figur 18: a) Bildet er tatt før prøven knuses b) bildet er tatt etter at prøven er knust med håndkraft

Figur 18 viser to bilder før og etter et prøvestykke med polyurea er knust med håndkraft, bildet er tatt omtrent 60 minutter etter påføring. Prøvestykket har dannet lag med polyurea mot kald røroverflate. Kapps & Buschkamp, (2004) beskriver i sin produksjonmanual at røroverflaten må være over 15 °C dersom heft mellom rør og overflate ikke skal hemmes. Det hjelper heller ikke å øke temperaturen på komponentene da dannelsen av polyurea skjer momentant når skummet treffer en kald overflate. Det nevnes ikke noe om tallfestet heftkapasitet til overflaten.

4 Krefter i bend

I en rørgate er det vanlig å ha vertikale og horisontale retningsendringer for å endre rørtraseens retning i terrenget. Retningsendringene fører til bendkrefter. Dersom kreftene er større enn hva rørgata er dimensjonert for, må kreftene tas opp med forankring. Slike områder kalles for bend. Bendene kan utføres i ulike avvinklinger og leveres gjerne som egne bendmuffer. De ytre lastene bendet blir utsatt for og hvordan de beregnes er gjengitt i tabell 7.

Tabell 7: Krefter som oppstår i rørbend (Guttormsen, 2016)

Benevning	Ytre last	Beregning
P ₁	Vanntrykk oppstrøms	$P_1 = p_{maks} * a_i$ (4)
P ₂	Vanntrykk nedstrøms	$P_2 = p_{maks} * a_i$ (5)
P ₃	Friksjon i opplegg	$P_3 = k_f * (G_v + G_{rør}) * \cos \alpha$ (6)
P ₄	Aksialkomponent av rørvækt	$P_4 = G_{rør} * \sin \alpha$ (7)
P ₅	Tverrsnittsendring	$P_5 = p_i * (a_1 - a_2)$ (8)
P ₆	Friksjon øvre ekspansjon	$P_6 = k_f * p_i * \pi * d * l$ (9)
P ₇	Friksjon nedre ekspansjon	$P_7 = k_f * p_i * \pi * d * l$ (10)
P ₈	Falltapskrefter	$P_8 = h_f * L * a_i * \gamma_w$ (11)
P ₉	Impulskraft	$P_9 = \rho_w * Q * V$ (12)

Kreftene virker i ulike retninger og utgjør en resultantkraft med retning ut av bendet. Resultantkraften regnes ut ved å summere kreftene i x- og y-retning ved vektorberegninger. Naturligvis er lastene av ulik størrelse, blant annet har impulskraften mindre innvirkning enn vanntrykket. Resultantkraften vil prøve å trekke bendet og rørgata ut av posisjon. Trykket som oppstår er lik kraften vannet trykker mot i det projiserte arealet på rørvæggen. Bendet må stabiliseres med enten strekkfaste skjøter, betongklosser eller PU-skum.

4.1.1 Kraftopptak i muffekobling

Den mest vanlige metoden for å lage avvinkling i rørgater er ved bruk av spesialbestilte bendmuffer. En bendmuffe er et rørstykke som er laget i en spesialbestilt vinkel (figur 19).



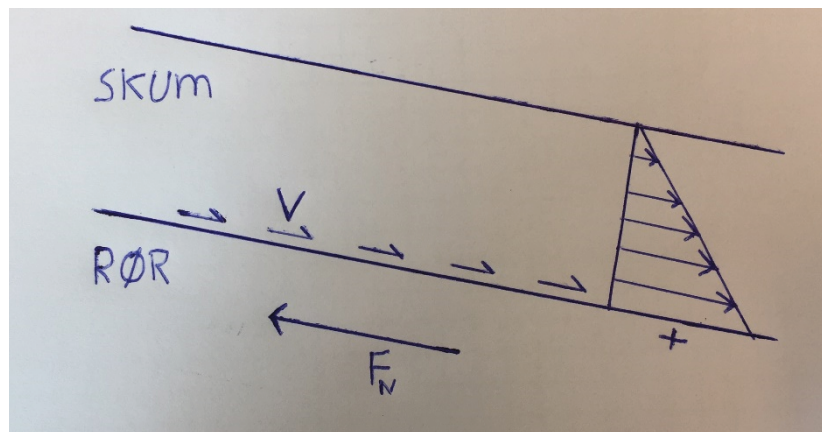
Figur 19: Bendmuffe i GRP (YLE GmbH, 2017)

I bendmuffa legges det inn pakninger slik at tilstøtende rør ligger rett og røret ikke får lekkasjer. Pakningene i bendmuffa gir en friksjon mellom rør og pakning, dersom pakningene er montert korrekt. Resultantkraften i bendet prøver å trekke bendet og tilstøtende rør ut av posisjon.

Pakning tar opp en andel av kreftene gjennom friksjon mellom rør og gummi. Fenomenet forekommer kun dersom pakningene er montert korrekt. Ved eventuell feilproduksjon fra fabrikk eller feil ved montering, glir røret fritt mot pakningen. For bend forankret med PU-skum er dette mest ugunstige tilfelle og skummet må ta opp alle krefter. Derfor er viktig at forankring av bend med PU-skum dimensjoneres slik at skummet har kapasitet til å fordele alle krefter.

4.1.2 Kraftopptak i skumlagte bend

Kreftene i skumlagte bend overføres fra bend til skum gjennom heft mellom rør og skum. Heften overfører kreftene som skjærkrefter i rørets aksielle retning (figur 20). Opptredende skjærkraft avtar lineært utover i skumtverrsnittet dersom det forutsettes at kreftene i røret er eneste drivende kraft. Den lineære avtagelsen kommer av at kreftene fordeles på et større skumareal lenger ut i tverrsnittet. Derfor vil et brudd i PU-skum oppstå nærmest røroverflaten da området er mest kraftpåkjent.



Figur 20: Kraftopptak i skumlagt bend

Den utadrettede kraften i bendet bidrar til at skummet strekkes. Et brudd i skumtverrsnittet oppstår dermed som strekkbrudd over muffeskjøten. Derfor er strekkfastheten til skummet av spesiell betydning for kraftopptaket i bendet.

Skummet har størst styrke målt parallelt med heveretningen. Basert på valg av skumtype vil heveretningen enten være ut fra røret (direkte påføring med sprøyteskum), eller opp fra grunnen dersom det benyttes pour-skum og forskaling. Skumtverrsnittet som tar opp kreftene ligger normalt på heveretningen i begge tilfeller. For opptak av krefter er det mest ugunstig at kraftretningen ligger normalt på heveretningen.

Ved større kraftpåkjenninger og deformasjoner er ikke heft mellom rør og skum nødvendigvis avgjørende for overføring av krefter. Deformasjonene og forflytningen av rørdeler bidrar til at skummet strekkes, for å holde igjen deformasjonen må skummet ta opp krefter tilsvarende deformasjon. Røret overfører ikke lenger krefter til skummet gjennom heft, men som en last som trykker mot ei flate og det settes opp spenninger i skummet som følge av deformasjon. Kraften skummet må fordele kan da beregnes med bjelketeori ved at deformasjonen tilsvarer en kraftpåkjenning. På grunn av deformasjonen ved økt kraftpåkjenning trykkes bendet mot omkringliggende massene. Basert på E-modulen til massene forekommer et mottrykk som stabiliserer bendet. Siltige masser gir eksempelvis lite mottrykk, da silt har en lav E-modul.

4.1.3 Beregning av skumtvversnitt

Beregning av skumtvversnitt kan utføres etter prinsipp om at skummet skal fordele alle bendkrefter. Tversnittet beregnes i bruddgrensetilstand. Dermed kan det benyttes beregning basert på dekomponering av bendkreftene til aksialkrefter langs røret og strekkapasiteten til skummet mot røroverflata i bruddtversnitt. Det legges til grunn lastfaktor $\gamma_f = 1,2$ (Elstad, et al., 2011).

$$F_R = 2 * F * \sin \frac{\alpha}{2} \quad (13)$$

$$F = P_{dim} * A_{rør} \quad (14)$$

$$A_{skum} = \frac{2 * F}{f_{dskum}} \quad (15)$$

Hvor

F_R – Resultantkraft av bendkraft

F – Krefter langs røret

P_{dim} – Dimensjonerende trykk

f_{dskum} – Dimensjonerende strekkfasthet, skummet [kN/mm²]

Beregningen er den enkleste metoden for beregning av skumtvversnitt. Materialets styrke må reduseres med en materialfaktor. Elstad, et al. (2011) gir materialfaktor (γ_m) for stålkonstruksjoner mellom 1 – 1,6. PU-skum og stål har ulike egenskaper, men begge er duktile materialer som har en elastisk og plastisk fase. Stål er det nærmeste beslektede materialet til PU-skum angitt i veilederen. Dersom konservativ verdi av materialfaktor velges i dimensjonering er skummet ikke underdimensjonert. Strekkfastheten til skummet kan da beregnes med materialfaktor $\gamma_m = 1,6$ ved:

$$f_{dskum} = \frac{f_d}{\gamma_m} \quad (16)$$

5 Lille Måsevann pumpestasjon

Våren 2016 satte Statkraft Energi AS (Statkraft) i gang en fullskala feltutprøving med bruk av PU-skum som omfyllingsmasse. Hensikten med prosjektet var å undersøke, prøve ut og sanke erfaringer med PU-skum som omfyllingmasse rundt nedgravde rørgater. Prosjektet er lokalisert i Adamselv, Finnmark, og er en pumpestasjon som pumper vann fra Lille Måsevann til Store Måsevann – inntaksmagasinet til Adamselv kraftverk. Pumpestasjonen gir en økt årlig midlere produksjon til Adamselv kraftverk på 4.3 GWh (NVE, 2013). Utførende entreprenør var Fjellbygg AS med veiledende hjelp fra utvikler Penstock BV. Utbyggingen foregikk sommeren/høsten 2016. Pumpestasjonen ble startet opp 24.november 2016.



Figur 21: Lokalisering av Lille Måsevann pumpestasjon

Prosjektet innebar utbygging av en pumpestasjon med tilhørende 1130 m lang rørgate med DN 800 og 900 GRP-rør. Anlegget har konsekvensklasse 0. Omtrent 300 m av rørgata ble lagt med PU-skum som omfyllingsmasse, inkludert to bend. Resterende lengde ble lagt med tradisjonell metode med pukk/sprengstein. Langs rørgata (figur 22) ble det lagt skum med tverrsnitt 100 mm og rundt de to bendene 300 mm, målt normalt på røroverflata. Beregningene av skumtverrsnitt ble utarbeidet av Multiconsult ASA.



Figur 22: Rørgate lagt i skum ved Lille Måsevann

Pumpestasjonen har kapasitet til å pumpe $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ved full last. Høydeforskjellen mellom Store Måsevann og Lille Måsevann er 34 m. Pumpa er utstyrt med frekvensomformer som gjør det mulig å øke effekten til pumpa trinnvis. Dermed utsettes ikke rørgata for trykkstøt under driftsperioden. Ved full effekt utsettes rørgata for et trykk tilsvarende 44,2 mVs.

Enova var medvirkende til prosjektet med finansiell støtte, som var avgjørende for å kunne iverksette prosjektet. Hovedfokus i prosjektet var å undersøke hvilke praktiske utfordringer i

felt som må studeres videre. Blant utfordringer som ble avdekket var vannopptak, fryse og tineprosesser, varierende skumkvalitet og heft mellom rør og skum. Prøvestykker av skum ble skåret ut av rørgata for å kunne undersøke flere av utfordringene i ettertid ved NTNU. Johnsen (2017) benyttet prøvestykkene til forsøk med vannabsorpsjon, innvirkning av gjentatte fryse – tine sykluser og mekanisk styrke i frossen tilstand.

Tre ulike metoder for påføring av skum ble undersøkt for å finne den mest gunstige med tanke på kvalitet og tidsbruk. De tre påførings metodene var:

- Påføring direkte på rør ved sprøyting
- Åpen forskaling
- Lukket forskaling

De tre ulike metodene gav varierende resultater av kvalitet og tidsbruk. Leggemetoder, kvalitet og tidsbruk blir ikke vurdert i denne masteroppgaven.

Rørgata har to DN 900 bend plassert 11 og 23 meter oppstrøms pumpestasjonen. Begge er forankret med 300 mm PU-skum og har 15 ° avvinkling i horisontalplanet. Det ble benyttet direkte påføring på røret med sprøyteskum. Totalt ble begge bendene forankret over fire dager.

Under byggingen av rørgata til Lille Måsevann var ikke prosjektdeltakerne klar over at overflatetemperaturen på røret hadde innvirkning på skummets heft. Denne informasjonen kom sent frem til byggherre og entreprenør, produksjonen av skum var da allerede i gang. Overflatetemperaturen på røret under påføring av skum må antas å være omtrent lik lufttemperaturen, altså rundt 11 °C. Under arbeidet kom det frem at røret måtte varmes opp til minst 22 °C for å få tilstrekkelig heft (Covestro, 2016). Etter at informasjonen kom frem ble det gjennomført undersøkelser av heft på allerede lagt skum som viste at heften var tilnærmet lik null. I praksis hadde dette lite betydning for strekningene som allerede var lagt da avvinklingen i muffeskjøtene var under 1,5 °, helningen var slak og innvendig trykk var under 40 mVs. Skummets oppgave på strekningene var å beskytte røret mot mekanisk skade fra omfyllingsmassene.

I bend er det mest kritisk at tilstrekkelig heft til rør oppnås da bendkreftene overføres til skummet gjennom heft. Rørene i bendet ble derfor varmet opp ved å bygge et provisorisk telt med innblåsing av varmluft. Temperaturen på røroverflaten ble målt rett før påføring av skum med et IR-termometer, temperaturen varierte mellom 18 – 26 °C. Under utvinning av prøvestykker ble det observert forbedret heftkapasitet sammenlignet med tidligere undersøkelser. Imidlertid ble ingen forsøk utført for å tallfeste heftkapasiteten i bendet.

5.1 Målinger og analyse av deformasjon ved Lille Måsevann

5.1.1 Motivasjon

Utover bendene ved Lille Måsevann har ikke PU-skum tidligere blitt benyttet til forankring av bend. Det er usikkert hvordan langtidsvirkningene av gjentatte av- og påslag i skumlagte bend påvirker skummet. I tillegg er levetiden til skummet noe usikkert da effekten av fryse- og tineprosesser ikke er undersøkt. For videre utvikling av metoden må deformasjonene i skumlagte bend over tid undersøkes. 24.10.16 ble fire ekstensometre montert på bendet nærmest pumpestasjonen. Det var forventet at kreftene var størst i det aktuelle bendet.

5.1.2 Instrumenter og metode

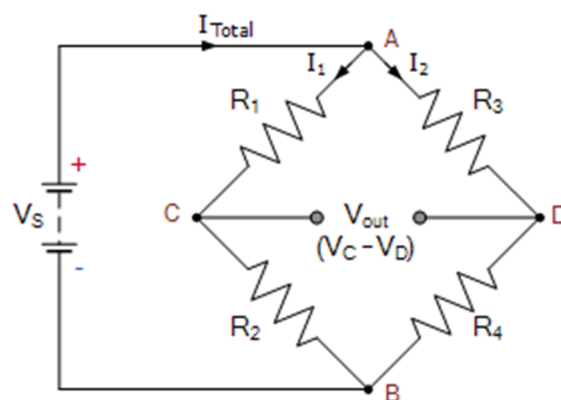
Deformasjonsmålinger er mye brukt i metallindustri for å undersøke temperaturutvidelser. Det kreves presise instrumenter for å gi nøyaktige verdier (HBM, 2016). Strekkklapper eller "displacement transducer" (stillingsgiver) er mye benyttet til formålet. For å undersøke deformasjonene i bendet ved Lille Måsevann ble det valgt å benytte stillingsgivere av typen "WA inductive displacement transducers" som ikke krever rett underlag. Dette var gunstig da stillingsgiverne ble montert på muffene. I tillegg var stillingsgiverne enkle å montere og avlesning av data krevde lite ekstra utstyr.



Figur 23: WA inductive displacement transducer (HBM, 2016)

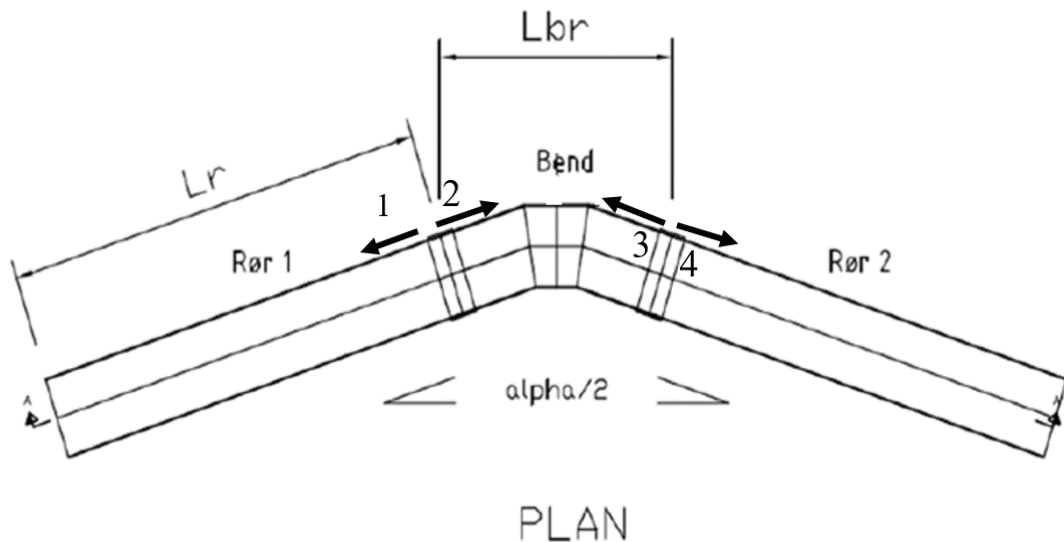
Stempelet eller målepinnen slik som vist på figur 23 kan beveges fritt frem og tilbake. Ettersom stempelet beveges i akseil retning var det ikke mulig for utstyret å måle bevegelse i y- og z-planet.

Systemet er basert på et prinsipp innen elektronikk kalt "Wheatstones målebro" (figur 24) og benyttes på grunn av nøyaktigheten i måleresultater. Broen er bygd opp av to parallell-serie koblede resistanser med en jording som er spenningsfri, dersom broen er i balanse. Broen er i balanse når spenningene på hver side av broen er like, $R_1=R_3$ og $R_2=R_4$ (Electronics Tutorial, u.d.).



Figur 24: Prinsippskisse av Wheatstone målebro (Electronics Tutorial, u.d.)

En endring i resistansene gir ubalanse og spenningsforskjeller i broen. Når stempelet forflyttes beregner stillingsgiveren utslaget ved å måle spenningsforskjellene som oppstår i broen. Dataene sendes til en loggestasjon som kobles til en pc der resultatene leses av. Utstyret leveres ferdig kalibrert og det eneste som kreves er nullstilling av stillingsgiverne for å definere et nullpunkt.



Figur 25: Plassering av stillingsgivere på bendedet ved Lille Måsevann

Figur 25 viser plassering av utstyret, hvilken retning stempelet trekkes ut og hva de er kalt under målingene. Ekstensometrene beregner avstanden fra et nullpunkt som blir definert ved førstegangsbruk av utstyret. Nullpunktet ble definert dagen utstyret ble montert. På grunn av satt nullpunkt vises strekk i stillingsgiverne som synkende verdier mellom 1 til -20 mm. Stillingsgiverne kan måle inntil 21 mm i retningen de er satt opp og ble montert på hver side av bendmuffa. Stempelet ble festet i et vinkeljern limt fast på røret. Stillingsgiveren ble limt fast i braketter på muffa (figur 26). Tilsvarende oppsett ble benyttet på andre siden av muffa.



a)

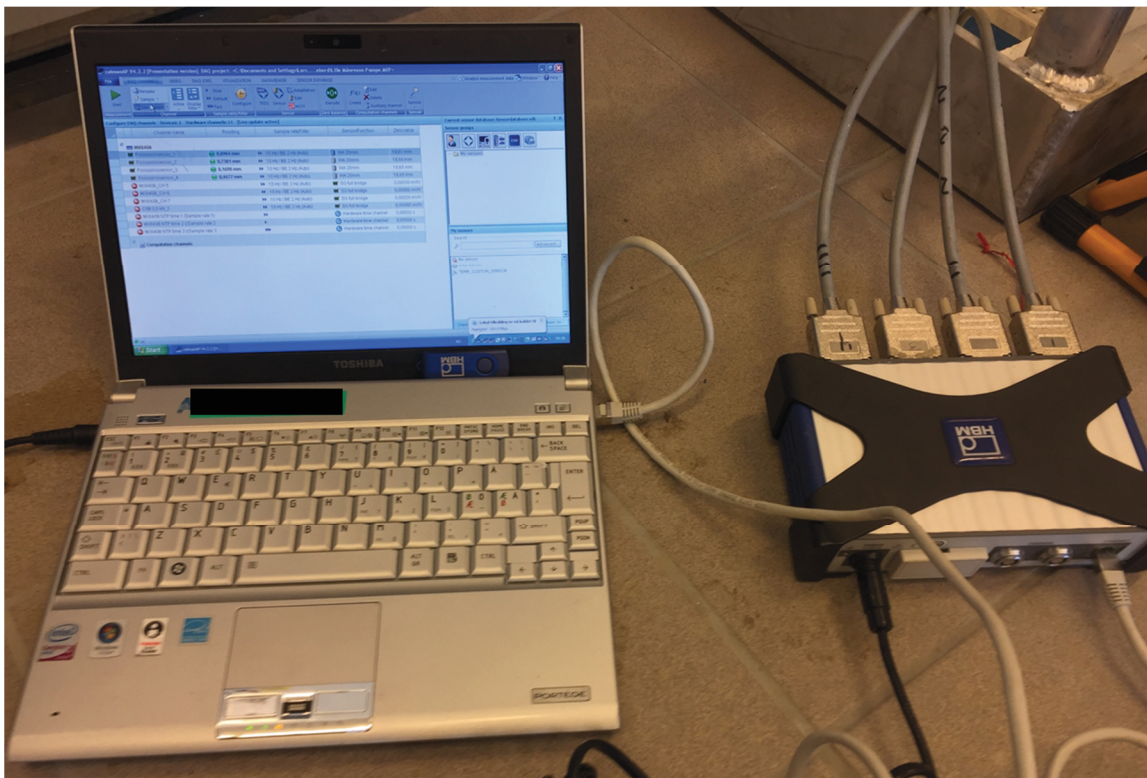


b)

Figur 26: a) Stillingsgiver 4 plasser på rør og muffe b) Stillingsgiver 4 beskyttet med PE rør

Installering av utstyret krevde nøyaktighet og forsiktighet for å ikke ødelegge utstyret. Representant fra leverandør av utstyret var med under hele monteringen. Etter montering var det ingen tegn til skade på utstyret. Stillingsgiverne ble kapslet inn i halvrør av PE slik at utstyret ikke ble ødelagt ved påføring av skum på bendet.

Til avlesning av dataene fra loggestasjonen trengs en PC og et dataprogram (figur 27). Ved Lille Måsevann ble Catman DAQ benyttet. Programmet viste forflytning i sanntid og lagret dataene som Excelfil. Utstyret hadde kapasitet til å utføre opptil 10 000 målinger i sekundet, det ble valgt å gjøre 10 målinger i sekundet. Nøyaktigheten på utstyret er 0,1 % av maksimalt utslag, altså 0,02 mm (HBM, 2016). For å kunne lese av dataene korrekt var det nødvendig å vite hvilken retning stillingsgiverne var satt opp og når bendet ble utsatt for maksimalt vanntrykk.



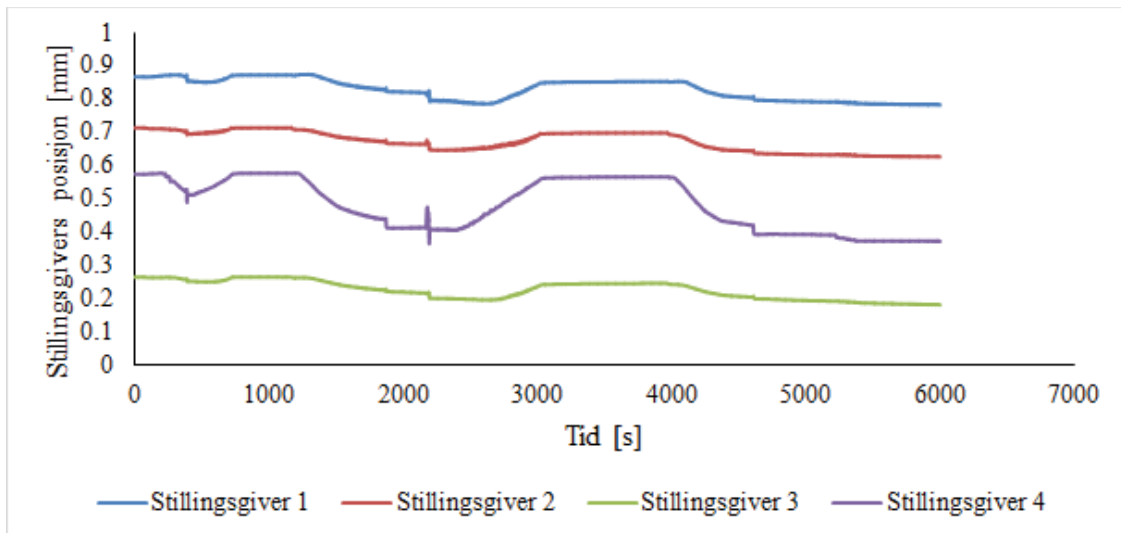
Figur 27: Datamaskin med loggestasjonen som ble benyttet til målinger ved Lille Måsevann

Utstyret er følsomt så forstyrrende elementer som bilkjøring eller vibrasjoner nær stillingsgiverne kan gi utslag. Ettersom utstyret bruker elektriske signaler kan de også bli påvirket av andre elektriske signaler som strømførende kabler. Derfor var det under målingene vesentlig at ingen forstyrrende elementer var i nærheten av stillingsgiverne.

5.2 Resultater

5.2.1 Målinger utført november 2016

Som resultatene viser starter ikke stillingsgiverne i nullposisjon. Årsaken er at stillingsgiverne ble nullstilt før anleggsarbeidene var over. Fra dagen utstyret ble nullstilt til første måling har stillingsgiverne trukket seg sammen tilsvarende startverdien vist i måleserien i figur 28.



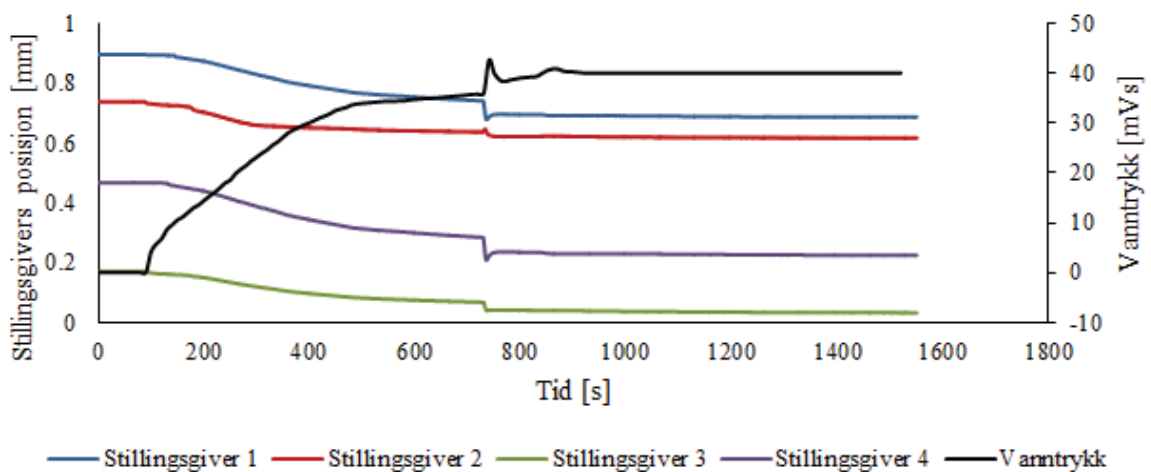
Figur 28: Deformasjonsmåling ved gjentatt fylling og tømming av rørgata, 24.11.16

Målingene i figur 28 viser flere start og stopp sekvenser, derfor varierer målingene ofte mellom topp- og bunnpunkt. Vertikal akse gir stillingsgivernes posisjon og reel deformasjon er utslaget mellom toppunkt og bunnpunkt til gitt stillingsgiver. Under målingene ble det tatt notater av vanntrykk ved gitte tidspunkter. Notatene er så lav kvalitet at de ikke kan benyttes til å gi vanntrykk ved gitt tidspunkt. Imidlertid er notatene blitt brukt til å vite når bendet ble utsatt for maksimalt vanntrykk, som forekommer rundt 4500 sekunder inn i målingene.

Det faktum at målingene viser flere start og stopp sekvenser, uten noen gode notater av vanntrykk, fører til en begrensning i hvilke resultater som kan tas ut av målingene. De resultatene som kan tas ut fra målingene er at ved økende vanntrykk strekkes stillingsgiverne, og maksimal deformasjon er omtrent 0,2 mm.

5.2.2 Målinger utført april 2017

Basert på kunnskap fra tidligere målinger, ble det valgt å dele opp måleseriene til en start- og en stoppsekvens. Målingene er vist i figur 29 og 30. Det ble også valgt en annen løsning for notering av vanntrykk. Under målingene ble vanntrykket skrevet ned hvert 10 sekund, etter at målingene startet.



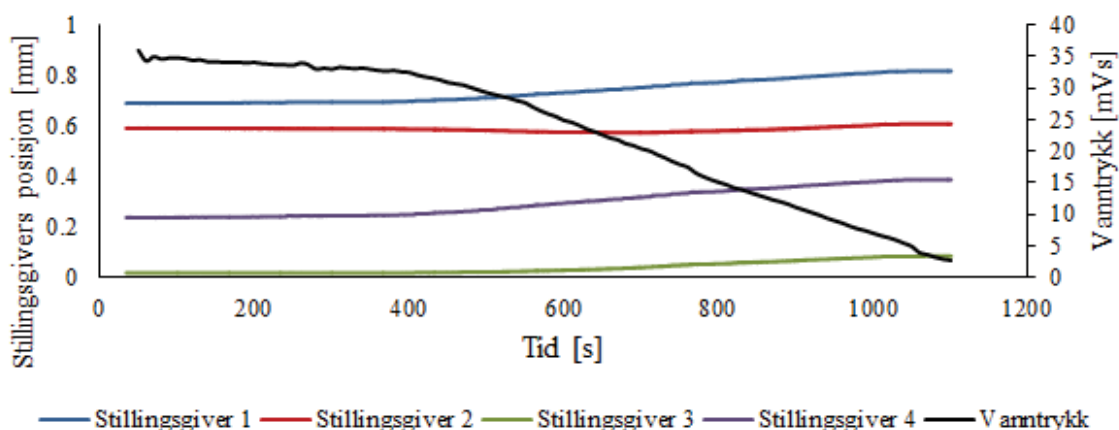
Figur 29: Deformasjonsmålinger ved fylling av rørgata, 28.04.17

Stillingsgiverens posisjon er gitt på venstre akse, mens vanntrykket (sort linje) er gitt på høyre akse (figur 29 og 30).

Målingene bekrefter at skummet fordeler krefter som strekkspenninger. Største deformasjon er gitt i stillingsgiver 1 og 4, henholdsvis 0,15 og 0,2 mm. Målte deformasjoner er lavere enn antatt. Dette tyder på at kreftene i bendet ikke bare fordeles i skummet, men også i omkringliggende masser, bendmuffe og grensesjiktet mellom pukkk og skum. Omkringliggende masser er sannsynligvis største bidragsyter til opptak av krefter. Aaker (2016) beregnet for samme bend at en forflytning på 0,2 mm setter opp 18 kN i skummet. Kreftene skummet er dimensjonert for å ta opp er 330 kN. Omtrent 1/20 del av kreftene er da fordelt i skummet. Verdien er basert på grove beregninger, men viser størrelsesorden i opptak av krefter. Skumlagte bend får en overkapasitet i felt som ikke tas hensyn til i dimensjonering og planlegging.

Målingene viser deformasjon i rørets aksiale retning, og ikke reel deformasjon i kraftens retning. Det vil si at målingene kun viser om muffene er på vei til å gli ifra hverandre. Målingene viser ikke hvordan bendet flyttes i terrenget. Imidlertid forplantes deformasjoner i kraftens retning videre til muffene, som stillingsgiverne kan plukke opp. Men utførte målinger kan ikke benyttes til å utrykke forflytting i kraftens retning. Ingen målinger er utført på deformasjon i kraftens retning som kan kobles opp mot en gitt deformasjon i aksiell retning.

770 sekunder inn i målingene ved fylling av rørgata 28.04.17 (figur 29) kan en plutselig økning i vanntrykk observeres. Årsaken til "hoppet" var snø som hadde lagt seg utenfor utløpet. Vannet bygget da et mottrykk som forplantet seg videre nedover i rørgata. Trykket ble jevnet ut igjen etter at vannet fant en vei under snøen. Samtlige stillingsgivere responderer til trykkøkningen. Sammenhengen mellom trykkøkning og forflytting viser at stillingsgiverne er intakte og målinger er faktiske deformasjoner i muffa.



Figur 30: Deformasjonsmålinger ved tømning av rørgata, 28.04.17

Ved tømning av rørgata (figur 30) går stillingsgiverne tilbake til sin posisjon før bendet ble utsatt for vanntrykk. Skummet fordeler da kreftene uten varige deformasjoner, og skummet i bendet kan beskrives som elastisk. Langtidsvirkninger av gjentatte fryse- og tineprosesser kan ha innvirkning på mekaniske egenskaper og elastisitet til skummet over tid. Johnsen (2017) har utført forsøk på innvirkning av fryse- og tineprosesser til prøvestykker av skum tatt fra Lille

Måsevann. Resultatene fra forsøkene viser at skum med god kvalitet får liten innvirkning på mekanisk styrke ved gjentatte fryse- og tineprosesser. I forsøket ble det gjennomført ti slike sykluser før materialet ble testet for mekaniske egenskaper. Imidlertid er det for tidlig å trekke en konklusjon om at bendet ikke blir påvirket av fryse- og tineprosesser da det er utført få målinger av deformasjoner i bendet.

Som nevnt tidligere kan målingene bli påvirket av andre elektriske signaler og rystelser i bakken. Under målingene var nærliggende anleggsvei stengt for vinteren og uten trafikk. Påvirkninger av rystelser vurderes som lite sannsynlig. Stillingsgiverne kan derimot ha blitt påvirket av strømførende kabler som går til pumpa. Imidlertid er dette lite trolig, da målerkablene er lagt i en separat kabelføring inn i bygget. Generelt knyttes det liten usikkerhet til resultatene i målingene. Alt tatt i betraktning er deformasjonene minimale som tyder på at kreftene i bendet fordeles andre steder enn i bare skummet. Deformasjonene viser at der er en overkapasitet og tillagt sikkerhet i skumlagte bend som ikke tas med i kapasitetsberegninger.

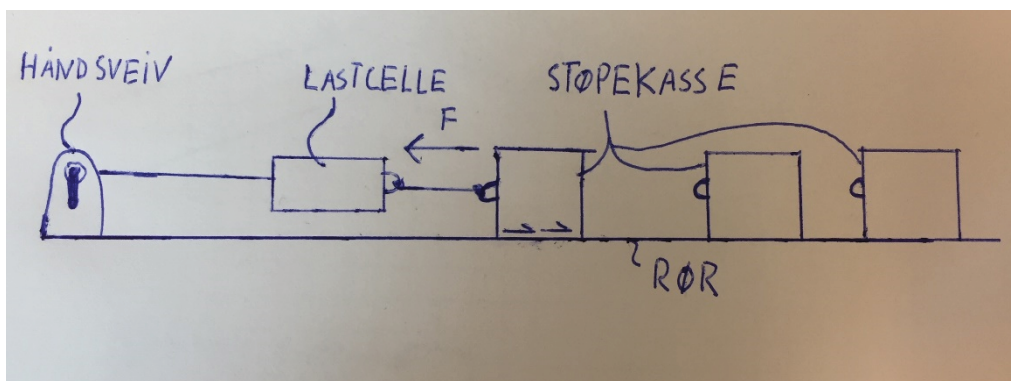
6 Forsøk av heft mellom skum og rør

6.1 Motivasjon

Under bygging av rørgata til Lille Måsevann var spesielt å skape heft mellom skum og rør en utfordring. Dersom metoden skal brukes til forankring av bend, er heft til rør en av utfordringene som må undersøkes. Heftkapasiteten uttrykker kraft per areal som skal til for at skummet rives løs fra røret i aksialretning. Etter oppvarming av bendet ved Lille Måsevann ble det observert økt heftkapasitet, men det ble aldri utført forsøk for å kvantifisere kapasiteten. Ytterlige forsøk av heftkapasitet var derfor nødvendig.

6.2 Oppsett av forsøk

Tidligere forsøk på heft mellom skum og GRP-rør viser at heftkapasitet varierer mellom $\tau = 65 - 800$ kPa. For duktile støpejernrør er det ikke utført forsøk, og verdien er derfor gitt som en teoretisk verdi av heftkapasitet $\tau = 200$ kPa. Forsøkene i denne oppgaven inneholder forsøk på GRP-rør og duktile støpejernrør. PE rør kunne og vært med i forsøket ettersom det benyttes i vannkraftbransjen, men er utelukket da PU-skum i utgangspunktet ikke festes til PE. Det vurderes dit hen at dersom PU-skum skal brukes som omfyllingsmasse er ikke PE rør beste alternativ. I tillegg er det utført forsøk for å undersøke om pussing av GRP-rør øker heftkapasiteten.



Figur 31: Prinsippskisse av forsøksoppsett

I Vassdragslaboratoriet ved NTNU ble det kuttet av et rørstykke i GRP med diameter 323 mm. Rørstykket ble benyttet til samtlige forsøk som inneholdt rørtypen GRP. Røret ble boltet fast i en pall som gjorde transport og flytting av røret enklere. Trekkmekanismen i forsøket var en håndsviv som ble boltet fast i enden på røret. Prinsippskisse av forsøket er vist i figur 31. Forsøkets oppsett i laboratorium er vist i figur 32.



Figur 32: Oppsett av forsøk på GRP-rør

Tre støpekasser av firkantet aluminiumsrør (80 x 40 mm) ble kuttet og tilpasset røret slik at skummet fikk et definert bunnareal mot røret. Mellom håndsveiven og de tre støpekassene ble det festet på en vekt for å lese av den aksielle kraften som ble satt opp mellom skum og rør. To ulike vekter ble benyttet i forsøket. Til måling av krefter <35 kg ble en Globe bagasjevekt benyttet, og til krefter >35 kg ble en Kinetic fiskevekt benyttet. Før forsøket ble det undersøkt om vektene målte korrekte verdier ved å måle et lodd med kjent vekt – begge viste riktig verdi.

Forsøkene med støpejernsrør ble utført etter samme prinsipp som GRP-rør. Et duktilt støpejernsrør ble satt på linje med GRP-røret og samme håndsveiv ble benyttet. Skummet ble støpt i samme støpekasser benyttet under forsøket med GRP-rør (figur 32). Før påføring av skum ble både GRP- og støpejernsrøret vasket med aceton. Fett og skitt på røroverflaten reduserer heftkapasiteten mellom skum og rør, aceton fjerner alt av fett og skitt som kan ligge på røret. PU-skum brytes ned av løsemidler og røret måtte derfor tørkes nøye etter vasking.

Overflatetemperaturen på røret under påføring av skum er kritisk for heft. For å ha kontroll over temperaturen på røroverflaten før påføring av skum var det nødvendig å benytte måleutstyr med høy grad av nøyaktighet. Derfor ble det



Figur 33: Temperaturmåler Hobo UX120-014M.
Målepunktene er under ductapen.

benyttet en termometer av typen Hobo UX120-014M Type J (figur 33). Måleren utførte målinger hvert 10 sekund med en nøyaktighet på $\pm 0,6$ °C og kan ha inntil fire ulike målepunkter, men i forsøkene ble kun to benyttet da eier av utstyret hadde to tilgjengelig (Onsetcomp, 2017). Utstyret hadde i tillegg en LCD skjerm som gjorde det enkelt å overvåke temperaturen. Ettersom det ble observert bedret heftkapasitet ved oppvarming av bend ved Lille Måsevann fokuseres det i oppgaven på heftkapasitet rundt 20 °C.

Totalt ble 18 forsøk med endring i parameterne rørtype, overflatetemperatur på røroverflate, pusset GRP-rør og herdetid. Forsøkene er vist i tabell 8.

Tabell 8: Utførte forsøk og parametere

Forsøksnummer	Rørtype	Overflatetemp [°C]	Pusset rør	Herdetid [timer]
1	GRP	16		1
2	GRP	17		1
3	GRP	18		1
4	GRP	19		1
5	GRP	20		1
6	GRP	21		1
7	GRP	22		1
8	Støpejern	19		1
9	Støpejern	20		1
10	Støpejern	21		1
11	Støpejern	22		1
12	GRP	>40		1
13	GRP	20	X	1
14	GRP	21	X	1
15	GRP	22	X	1
16	GRP	22		2 dager
17	GRP	22		7dager
18	GRP	22		14 dager

Forsøkene er utført i rekkefølgen gitt i tabell 8. Ny informasjon om herdetid og dannelse av polyurea på kalde overflater kom til under arbeidet med forsøkene. Derfor ble parameterne

herdetid og overflate temperatur $>40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ikke valgt på forhånd, men kom til under arbeidet med forsøkene.

6.2.1 Utførelse av forsøk

Før hvert forsøk ble polyol og isocyanate veid nøye i to kopper (figur 34). Blandingsforholdet mellom polyol og isocyanate er 1:1,43 i vekt. Vekten som ble benyttet til veiing av komponentene er kalibrert mot en annen vekt ved å veie et lodd med kjent vekt – begge vekter viste samme verdi.



Figur 34: Oppveiing av isocyanate (brun væske) og polyol (lys væske)

Til sammenrøring av skummet (figur 35) ble det benyttet tilsvarende utstyr som i Svalesen (2015), en drill med inntil 3300 omdreininger og en rørepinne. Isocyanaten ble tømt over i koppen med polyol. Det ble værende igjen en andel isocyanate i koppen etter sammenblanding. Etter flere prøvestøp viste det seg at omtrent 15 g ble igjen i koppen. I videre forsøk ble det lagt til 15 g isocyanate under oppveiing. I ettertid ble koppen med isocyanate igjen veid for å bekrefte blandingsforholdet.



Figur 35: Blanding av skum til forsøk. Til høyre i bildet er koppen med gjenværende isocyanate

Etter at skummet ble tømt i tre støpeformer ble de herdet i 60 minutter før de ble trukket. Merk at herdetiden i forsøket er under anbefalt herdetid på 48 timer (Covestro, 2017). Det ble på tross av dette valgt å la skummet herde i en time ettersom mye av styrken er utviklet etter kort tid. I tillegg hadde det vært upraktisk å la samtlige tester herde i 48 timer da forsøkene hadde tatt lang tid.

Blandingsforholdet mellom polyol og isocyanate ble nøye kontrollert både før og etter påføring av skum. Blanding av skummet ble utført på en slik måte at komponentene ble godt blandet sammen basert på visuelle observasjoner. Skummet fikk en homogen kremaktig farge, uten flekker og hulrom, noe som tyder på god kvalitet (Johnsen, 2017). Det er da lite trolig at skumkvaliteten har innvirkning på resultatene.

6.3 Resultater

6.3.1 Heftkapasitet mellom ulike rørtyper og overflatetemperatur på rør

Samtlige forsøk i tabell 9 er herdet i en time. Arealet i tabellen er det definerte bunnarealet av støpeformen.

Tabell 9: Resultater av heft mellom skum og rør, ubehandlet

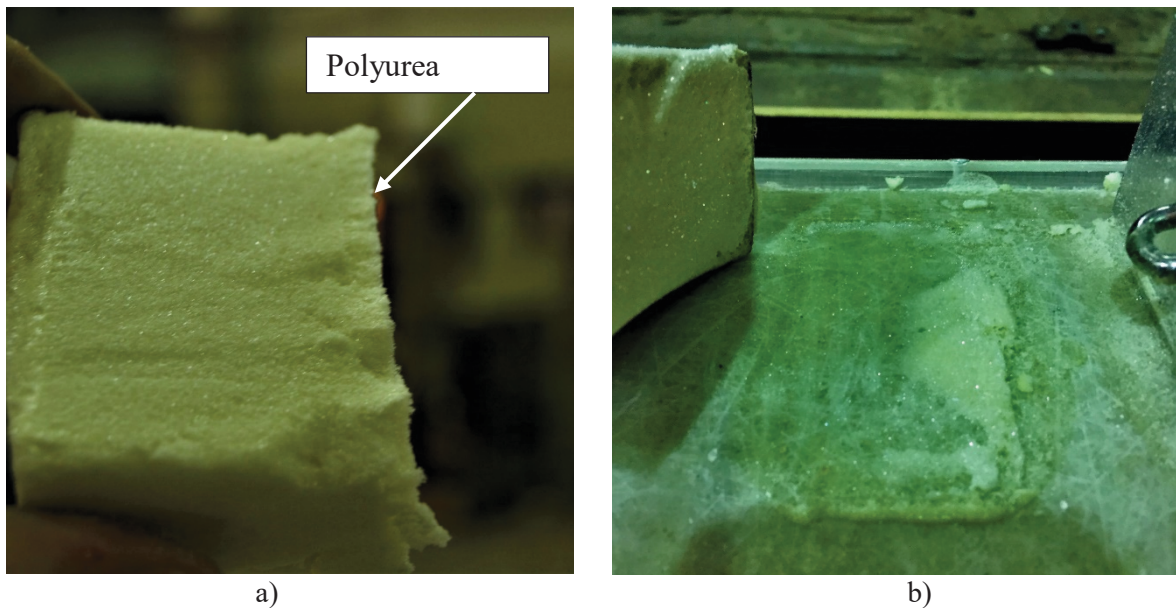
Rørtype	Overflatetemperatur rør [°C]	Kraft* [N]	SA** [N]	Areal [mm ²]	Vedheft [kPa]
GRP	16	37	10	3200	11
GRP	17	40	10	3200	13
GRP	18	35	4	3200	11
GRP	19	32	11	3200	10
GRP	20	49	13	3200	15
GRP	21	36	4	3200	11
GRP	22	53	13	3200	16
Støpejern	19	33	7	3200	10
Støpejern	20	27	11	3200	8
Støpejern	21	47	5	3200	15
Støpejern	22	54	24	3200	17

* Aksiell kraft i rørets retning

** Standardavvik

Forsøksresultatet viser ingen sammenheng mellom økt overflatetemperatur og heftkapasitet. Heller ikke endring av rørtype viser tegn til økt heftkapasitet. Resultatene avviker fra tidligere utførte forsøk fra Penstock BV (2017) og Patel (2016) ved like temperaturer, henholdsvis 300 kPa og 800 kPa. Årsaken til varierende resultater er usikkert da det er ukjent hvordan forsøkene er utført av de to skumleverandørene.

Polyurea dannes dersom skummet kommer i kontakt med en kald overflate. Under forsøket ble dannelsen av polyurea kontrollert etter hvert forsøk.



Figur 36: Bilder tatt etter forsøk med rørtemperatur 22 °C a) lag med polyurea b) vedheftsbrudd etter forsøk

Som figur 36 a) viser ble et tynt lag med polyurea dannet i overflaten som har vært i direkte kontakt med røret. Samtlige forsøk gav lag med polyurea nærmest røroverflaten. Tykkelsen på laget varierte fra forsøk til forsøk. Lavere temperaturer viste tykkere lag med polyurea. Tykkelsen varierte fra 10 mm ved rørtemperatur 16 °C til 5 mm ved rørtemperatur 22 °C. Figur 36 b) ble tatt i etterkant av forsøket og viser at bruddet kom i nevnt polyurea-lag. Dette indikerer at heftkapasiteten til skummet ble bestemt av styrken til polyurea-laget. Vedheftsbruddet var likt for samtlige forsøk med temperaturer ≤ 22 °C og en times herdetid på skummet.

6.3.2 Heftkapasitet ved rørtemperatur over 40 °C

Resultatene i tabell 9 ble utført basert på kjent kunnskap om dannelsen av polyurea mot overflater på rundt 20 °C etter erfaring fra Lille Måsevann. I løpet av arbeidet med forsøkene kom det frem ny informasjon som tilsier at overflaten må ha en temperatur på minst 40 °C for å unngå dannelse av polyurea (Covestro, 2017). Forsøket ble da gjentatt hvor røret ble varmet opp >40 °C med herdetid en time, resultatet er vist i tabell 10.

Tabell 10: Resultat av heft mellom rør og skum, røroverflate over 40 °C, ubehandlet rør

Rørtype	Overflatetemperatur rør [°C]	Kraft* [N]	SA** [N]	Areal [mm ²]	Vedheft [kPa]
GRP	>40	549	58	3200	171

* Aksiell kraft i rørets retning

** Standardavvik

Oppvarmingen gir en umiddelbar forbedring av heftkapasitet til skummet. Her ble det ikke observert lag med polyurea slik som i tidligere tester. Ettersom det ble benyttet en varmpistol til å varme røret er det usikkert eksakt hvilken temperatur røret hadde under påføring av skum. Temperaturmåleren viste varierende temperaturer mellom 45 – 60 °C under oppvarmingen.

Det kan dermed antas at overflatetemperaturen på røret var > 40 °C. Utførelsen ved forsøket var identisk med tidligere utførte forsøk.

Heftkapasiteten til røroverflate temperatur > 40 °C følger ikke samme styrkeutvikling som vist i figur 37. Her ble det ikke observert polyurea mot røroverflaten og skummet følger styrkeutviklingen til normalt PU-skum, hvor mesteparten av styrken utvikles over en kort tidsperiode. Dermed vurderes resultatet som en indikasjon på at overflatetemperaturer over 40 °C bedrer heftkapasiteten (τ) drastisk.

6.3.3 Heftkapasitet til GRP-rør pusset med sandpapir

Etter utfordringene som oppstod med å oppnå heft til rør ved Lille Måsevann, ble det stilt spørsmål ved om overflatebehandlingen av røret kunne være en årsak til redusert heft. Det ble derfor bestemt at forsøksserien inneholdt heftkapasitet av GRP-rør som var pusset med sandpapir. En del av GRP-røret ble pusset med P80 sandpapir til eksponering av glassfibertråder. Skummet ble herdet i en time før trekking og resultatet er vist i tabell 11.

Tabell 11: Resultater av heft mellom skum og rør, pusset rør

Rørtype	Overflatetemperatur rør [°C]	Kraft* [N]	SA** [N]	Areal [mm ²]	Vedheft [kPa]
GRP	20	20	15	3200	6
GRP	21	34	2	3200	11
GRP	22	53	13	3200	16

* Aksiell kraft i rørets retning

** Standardavvik

Sammenligning av tabell 9 og 11 viser at pussing av rør ikke gir økt heft mellom rør og skum. Det ble valgt å stoppe forsøket ved 20 °C, da resultatene viste at pussing ikke gav økt heftkapasitet.

6.3.4 Heftkapasitet ved økt herdetid

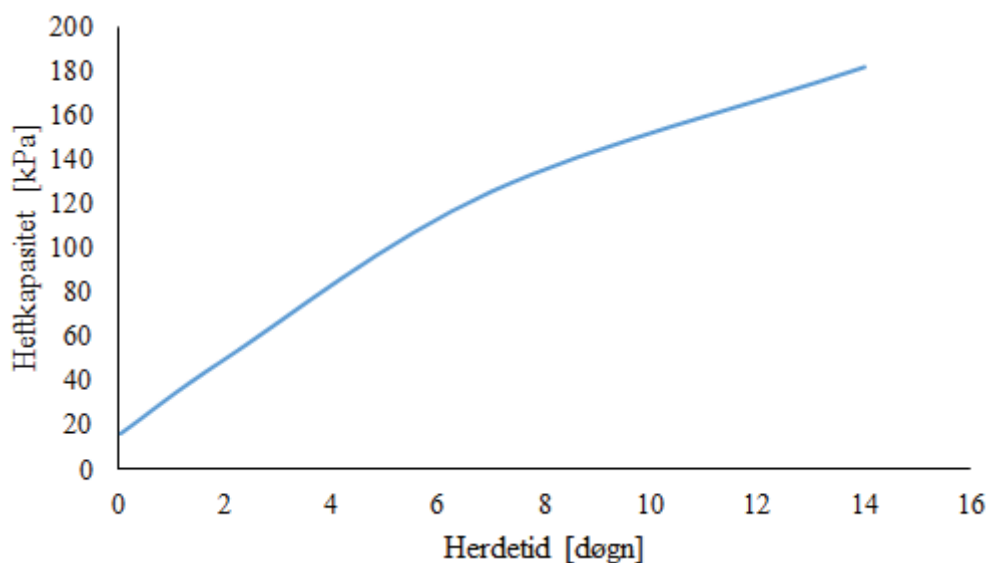
I løpet av forsøket ble det observert at polyurea-laget fastnet kraftig med økt herdetid. Et prøvestykke med polyurea var sprøtt og kunne knuses med håndkraft etter en times herding. Prøven ble liggende i laboratoriet i syv dager før den ble undersøkt igjen. Undersøkelsen viste at prøven var hard og kunne ikke lenger knuses med håndkraft. På bakgrunn av funnene ble det utført forsøk for å undersøke heftkapasiteten om øker dersom skummet får lengre herdetid. Skummet i forsøkene ble herdet i to, syv og 14 døgn, resultatet vises i tabell 12 og en grafisk representasjon er gitt i figur 37.

Tabell 12: Heftkapasitet mellom rør og skum med herdetid over 2 døgn, og ubehandlet rør

Rørtype	Herdetid [døgn]	Overflatetemperatur rør [°C]	Kraft* [N]	SA** [N]	Areal [mm ²]	Vedheft [kPa]
GRP	2	22	160	12	3200	50
GRP	7	22	402	29	3200	126
GRP	14	22	582	32	3200	182

* Aksiell kraft i rørets retning

** Standardavvik



Figur 37: Heftkapasitet (τ) ved temperatur 22 °C

Forsøket med økt herdetid tydeliggjør at skummets korte herdetid har vært en av årsakene til lavere resultater i tabell 9 og 11. Ikke tilstrekkelig herdetid er et avgjørende usikkerhetsmoment i forsøkene. Det betyr at heftkapasiteten i tabell 9 og 11 er misvisende grunnet kort herdetid. Dermed kan heller ikke verdiene i nevnte tabeller benyttes til å beskrive heftkapasiteten ved temperaturer under 22 °C. Resultatene vist i figur 37 kan ikke benyttes til å kalibrere verdiene i tabell 9. Årsaken er at strykeutviklingen til polyurea kan være ulik for temperaturer under 22 °C. Det har blitt undersøkt med leverandør av skummet om det finnes et alder – styrke forhold for polyurea, det finnes ikke.

6.3.5 Mulige usikkerhetsmomenter

Til samtlige undersøkte temperaturer er det utført tre tester av heft. I flere av testene er variasjonen i resultatene store, som standardavviket i tabell 9 og 11 viser. Spesielt ved lave kapasiteter (<100 N) er standardavviket betydelig. Variasjonene kan komme som følge av at håndsveiv ble benyttet. Med håndkraft som eneste kraftpåkjenning blir skummet blir utsatt for kraftvariasjoner. Dersom det hadde blitt benyttet maskinelt utstyr som kunne trukket med lik hastighet gjennom hele forsøket ville sannsynligvis usikkerheten blitt borte. Håndsveiv og kraftvariasjoner er et usikkerhetsmoment i forsøket.

To ulike vekter ble benyttet til å måle krefter gjennom hele forsøket. Vektene har ulik nøyaktighet og det er ikke funnet noen produktspesifikasjoner som forklarer nøyaktigheten til produktene. Dette resulterer i at nøyaktigheten til verdiene funnet i forsøkene er noe usikre.

Forsøkene tydeliggjør at heft til rør er vanskeligere å finne enn tidligere antatt der en definert overflatetemperatur på røret gir en viss heftkapasitet. På nye anlegg må det holdes kontroll på hvilken heft skummet har til røret, dersom PU-skum skal benyttes til forankring av bend.

Forsøkets oppsett og utførelse vurderes som god da det er knyttet få usikkerhetsmomenter til forsøket og oppsettet legger til rette for enkel utførelse. Derimot fører kort herdetid i flere av

forsøkene til misvisende resultater. Av undersøkte parametere; herdetid, overflatetemperatur på røret, rørtype og pussing av røret har herdetid og overflatetemperatur mest innvirkning på resultatene. Resultatene vist i tabell 9 og 11 er misvisende da polyurea-laget ikke har utviklet full styrke.

7 Skalaforsøk av bend i laboratorium

7.1 Motivasjon

I forbindelse med utbyggingen av Lille Måsevann ble to bend forankret med PU-skum. Etter kapasitetsberegninger utført av Multiconsult ble bendet forankret med 300 mm skum målt normalt på røroverflaten. Et av bendene ble instrumentert opp for å undersøke utviklingen av deformasjonene i driftsperioden. Utover overvåkingen av bendene har få forsøk blitt utført på bruddlast i skumlagte bend tidligere. Dersom metoden skal utvikles videre er det nødvendig å utføre systematiske tester av bruddlast i skumlagte bend. Forsøket er altså en destruktiv test av skummet.

7.2 Oppsett av forsøk

Som nevnt under punkt "4.1.1 Kraftopptak i muffekoblinger" kan en bendmuffe ta opp krefter. For å være sikker på å oppnå verst tenkelige tilfelle slik at alle bendkrefter tas opp i skummet bygges forsøket uten bendmuffe. Det ble diskutert flere løsninger til utformingen. Krefter og trykk er direkte skalerbare og blir ikke påvirket av skaleringslover. Derfor kunne forsøket bygges uten hensyn til slike lover som det blir gjort i andre modellforsøk. Forsøket inneholder endring i parameterne skumtvverrsnitt normalt på røroverflaten og bendvinkel.

7.2.1 Forslag til oppsett

Flere løsninger ble foreslått for å unngå at bendet tok opp krefter. Hensikten med forsøket var å bygge en modell av et bend som kunne påføres last til det oppstår brudd i skummet. Større rørdimensjon gir økt mengde skum rundt røret og kreftene som skal til for å bryte skummet økes deretter. Derfor inneholder forsøket rør med små dimensjoner slik at ønskelige krefter var mulig å sette opp i laboratoriet, på en sikker måte.

Et av forslagene til løsning var å lage avvinklingen i bendet med en traktordekkslange. Tanken var at slangen ikke tar opp særlige krefter og at forsøket ville bli enkelt å sette opp i laboratoriet. Kreftene var ment å bygges opp med vann- eller lufttrykk. Ulempen ved å benytte vann- eller lufttrykk er at kreftene ikke settes opp som en punktlast direkte i bendet, slik det ønskes i forsøket. Kreftene fordeles som en jevnt fordelt last i både rør og slange. Skummet hadde da gått til brudd som følge av slangens ekspansjon og ikke på grunn av bendkrefter. Forslaget ble forkastet da det ikke ville gi resultater som forsøket var ment til å gi.

Det siste forslaget var å bygge avvinklingen ved å bruke rør uten bendmuffe. Rørene var ment å kuttes skrått i enden i gitt avvinkling. Istedenfor å sette opp krefter med trykk inne i røret, skulle en tilsvarende punktlast settes opp ved trekke i ytterkant av bendet ved hjelp av metalkrok, kjetting, jekketalje og gaffeltruck. Forslaget la til rette for enkelt oppsett i lab med resultater og krefter i en skala som var gjennomførbar. Forsøket ble satt opp etter sist nevnte forslag og videre forklaring av utførelse er presentert under påfølgende avsnitt "7.2.2 Valgt løsning for oppsett".

7.2.2 Valgt løsning for oppsett

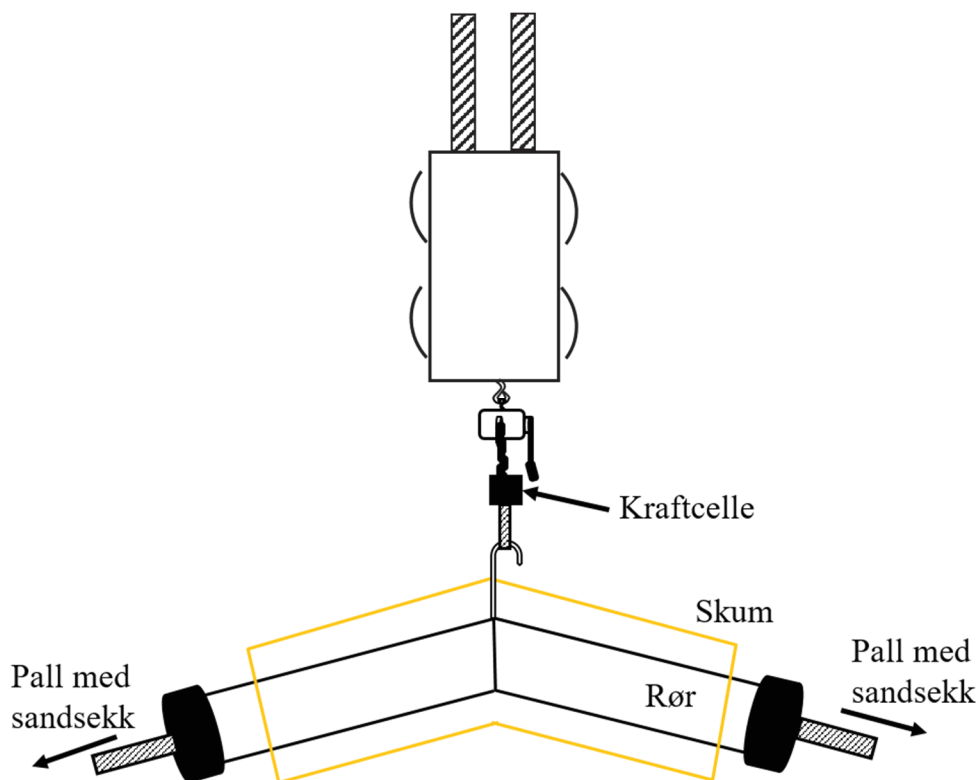
Avvinklingen i bendet ble laget ved skråkutting av GRP-rør med $d = 119$ mm. Rørene ble ikke festet til hverandre da sammenføyningen tar opp krefter. Skummet som ble benyttet var av typen pour-skum med reaksjonstid på fem minutter. På grunn av den lange reaksjonstiden måtte

det produseres en støpeform med korrekt avstand til røret slik at ønsket skumtværsnitt ble oppnådd. Forsøket undersøkte kun skummets strekkapasitet da det for bend er strekkfastheten til skummet som forsøker å holde formen på materialet og dermed røret på plass.



Figur 38: GRP-rør som ble benyttet i forsøkene, kuttet i 15 °

Den utadrettede bendkraften ble satt opp som en punktlast direkte i avvinklingen. Et krokfeste av armeringsjern sveist fast i en stålplate ble ført inn i røret gjennom et utskåret hull, se figur 38. En vedski ble limt fast i stålplata slik at røret ikke ble ødelagt av kreftene under forsøket. Vedskien ble tilpasset til hver bendvinkel. Med en rundslynge festet i kroken i bendet og gaffeltruck som mothold var det mulig å sette opp tre tonn med trekraft i forsøket. Mellom krokfestet og rundslyngen ble det festet en kraftcelle som kunne måle kreftene underveis i forsøket. Kraftcellen var av typen HFM 3TO.5 kranvekt som kan veie opp mot 3000 kg med en nøyaktighet på ± 6 kg (Kern, 2017). Vekten bruker strekkklapper som strekkes når vekten øker, denne metoden er velbrukt og benyttes ofte til større kranvekter.



Figur 39: Prinsipp tegning av forsøk for kraftopptak i bend.

På endene av bendet ble det festet to stålklammer til røret som ble forankret med rundslynger til paller med sandsekker (figur 39). Rundslynger er mindre elastiske enn for eksempel jekkestropper som òg kunne vært benyttet. Dermed gav rundslyngene mindre bevegelse i oppsettet, i tillegg var det mindre sjanse for tilbakeslag ved brudd i skummet. Det ble vurdert dit hen at paller med sandsekker som kan gli var en tryggere måte å forankre bendet, enn å bruke for eksempel stålramme til å fordele spenningene. Spenningene i systemet reduseres kraftig med en gang pallene flyttes. Under forsøket ble det holdt kontroll på hvor mye krefter som skulle til for å flytte pallene.

Fire ulike sirkulære tverrsnitt ble testet for 15° , 30° og 45° bend, totalt ble 11 tester utført. Skumtverrsnittene som ble undersøkt var 12 mm, 23 mm, 40 mm og 62 mm og ble valgt på bakgrunn av tilgjengelige materialer i Vassdragslaboratoriet. Som støpeformer ble det benyttet PVC-rør med diameter som gav ønsket skumtverrsnitt. Ettersom heft mellom rør og skum var viktig for kraftopptak ble det før hvert støp av skum undersøkt hvilken overflatetemperatur røret hadde. Heftkapasitet ble undersøkt ved å koble overflatetemperaturen til røret mot tilsvarende verdier i punkt "6.3.1 Heftkapasitet mellom ulike rørtyper og overflatetemperatur på rør".

Forflyttingen i bendet underveis i forsøket var nødvendig å undersøke for å kunne vurdere elastisiteten i skumlagte bend. Elastisiteten uttrykker forlengelse av materialet før brudd. Dersom skummet tillater forlengelse i kraftretningen kan muffene gli ifra hverandre uten at skummet har gått til brudd. I felt er dette imidlertid lite sannsynlig da omkringliggende masser gir et mottrykk og stabiliserer bendet. For å undersøke deformasjonene i forsøket ble det satt

opp et målebånd ved siden av jekketaljen med et kamera som filmer utviklingen. Videoen analyseres i ettertid for å finne deformasjoner.

7.2.3 Utførelse

Blanding av skum ble utført med samme utstyr og samme metode som ved forsøkene av heft i kapittel "6.2.1 Utførelse av forsøk". Nødvendig skumvolum av hver støpeform ble beregnet. Tyngdetettheten til polyol og isocyanate er henholdsvis 1,07 g/ml og 1,23 g/ml (Covestro datablad, 2016). Ved å anta at skummet ekspanderer omtrent 20 ganger ble det regnet ut hvor mye skum som trengs for fylle gitte former (tabell 13). Det var nødvendig at støpeformen ble fylt etter første støp slik at et homogent skum ble oppnådd uten støpeskjøt. Derfor ble noen ekstra liter skum lagt til i blandingen.

Tabell 13: Beregning av nødvendig volum skum

Tverrsnitt [mm]	Lengde støpeform [mm]	Volum av form [L]	Polyol [g]	Isocyanate [g]	Skumvolum [L]
12	700	3	200	286	8
23	700	7	300	429	13
40	700	14	450	644	19
62	700	25	700	1001	29

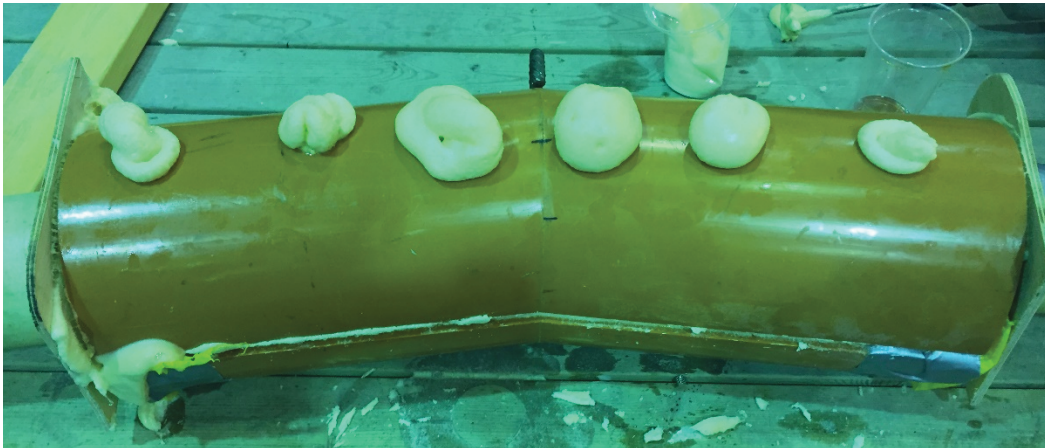
Etter sammenrøring av komponentene ble formen fylt med skum. PU-skum festes ikke til fettete overflater og margarin ble benyttet som slippmiddel i støpeformene.



Figur 40: Støpeform for støping av skum

I forkant av hvert støp ble det limt på avstandsklosser av ferdig herdet skum på undersiden av røret. Dermed lå røret midt i støpeformen før påføring av skum. I tillegg ble papir lagt over skjøten mellom de to rørene slik at skum ikke trengte inn i røret. Støpeformene ble laget i to

del, en bunnform og en toppform. Da skummet begynte å ese fra bunnformen ble toppformen lagt over som et lokk.



Figur 41: Skum under herding

På figur 41 kan det observeres seks klumper med skum som kommer ut av toppen på støpeformen, det betyr at formen er fylt med skum. Formen ble værende på i omtrent en time før den ble tatt av og skummet fikk ytterligere tre timer til å herde før bendet ble trukket. Merk at noen av forsøkene hadde lenger herdetid av praktiske årsaker. Skumtverrsnittet ble målt etter brudd for å kunne si om korrekt tverrsnitt ble oppnådd.

Et kamera ble satt som filmet kraftcellen, bendet og en tommestokk. Filmen ble benyttet i ettertid for å lese av krefter og deformasjoner i bendet.



Figur 42: Oppsett av forsøk

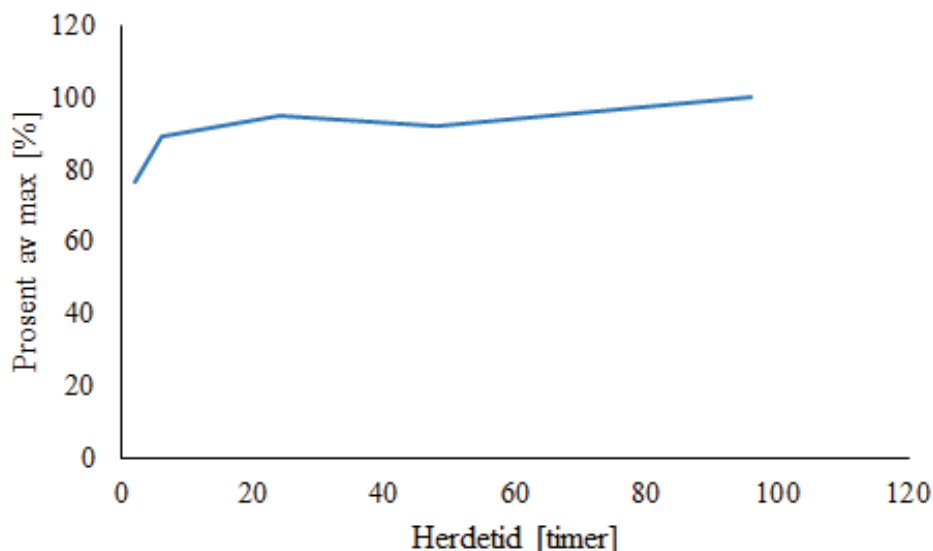
Trekkingen av bendet ble utført sakte for å unngå raske virkninger på skummet. Raske virkninger ville medført hyppige lastvariasjoner og kunne ført til at skummet gikk til brudd tidligere enn ved et jevnt drag. Bendet ble trukket til skummet gikk til brudd og forsøket ble avsluttet.

Prøvestykker av skum ble skåret ut av gjenværende skum i blandingskar. Densiteten av hvert enkelt prøvestykke ble målt og koblet opp mot forsøk som inneholdt forhold mellom densitet og styrke. Forholdet som ble benyttet er undersøkt i Johnsen (2017). Prøvestykkene ble skåret i nøyaktige mål for å kunne regne ut volum. Volumet til skummet kunne også blitt målt ved å legge prøvene i vann og måle differansen i vannvolum. Men utskårede prøver har åpne celler som raskt trekker til seg vann og gir urealistisk høye verdier av skumdensitet.

Hvert tverrsnitt ble testet en gang ettersom det hverken var tid eller skum nok til å kunne utføre flere tester. Det ble da ikke mulig utarbeide et standardavvik for forsøkene. Eventuelle variasjoner ved trekking, skumtverrsnitt, feilproduksjon av skum osv. vises ikke i resultatet da det ikke er mulig å sammenligne mot andre resultater. Antallet tester er et usikkerhetsmoment i utførelsen av forsøket.

7.3 Resultater

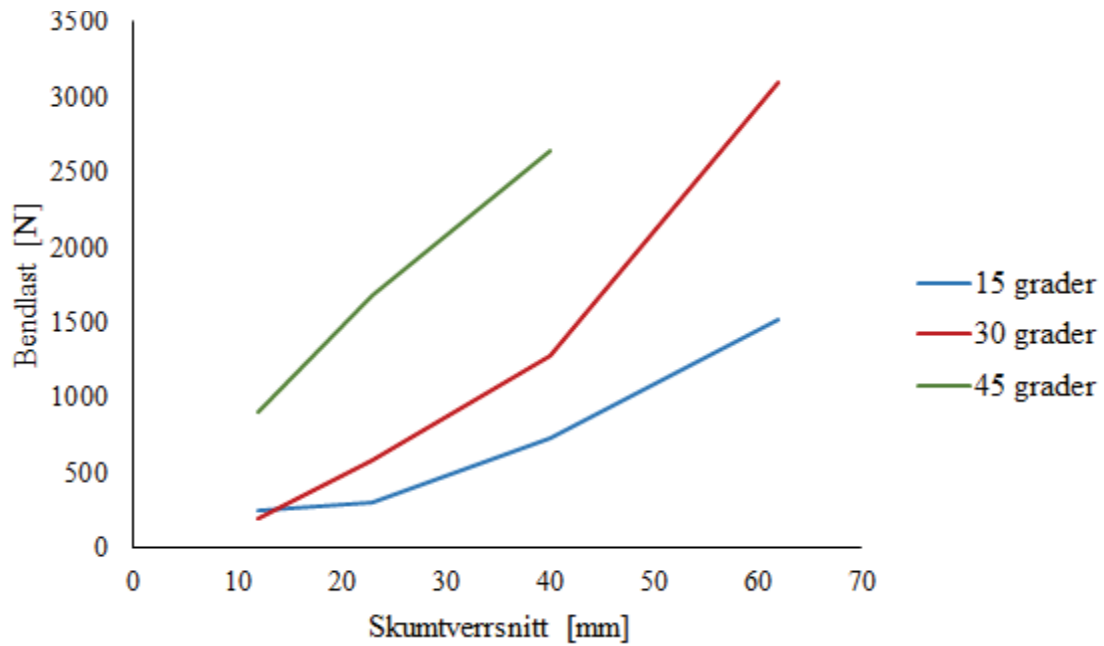
Herdetiden til skummet har mye å si for styrkeutviklingen da styrkeutviklingen kan pågå i 48 timer etter påføring. Covestro har ikke utarbeidet et alder – styrkeforhold for pour-skum. Det ble valgt å utarbeide et slikt forhold i Vassdragslaboratoriet. Det stilles stor usikkerhet til verdiene da kun et prøvestykke ble testet for hvert intervall. Resultatet er vist i figur 43.



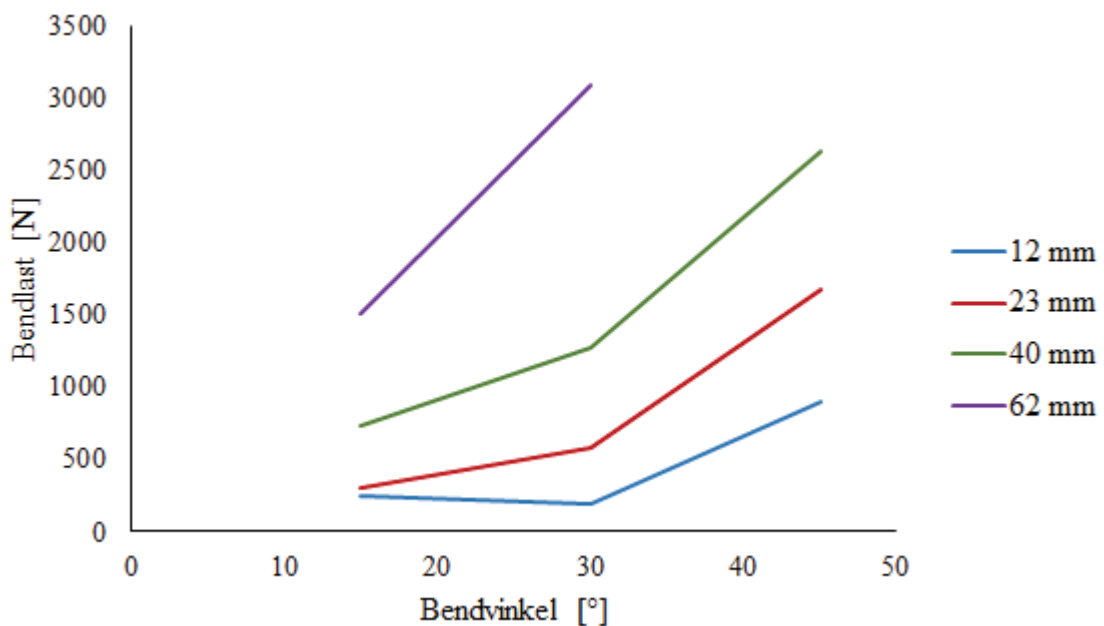
Figur 43: Alder-styrke for PU-skum

Korreksjonsfaktoren benyttes til kalibrering av bruddlast for skum med kortere herdetid enn 96 timer. Det antas at skummet har oppnådd full styrke etter fire dager og verdiene gis som en prosentvis andel av fire dagers styrke. Merk at styrkeutviklingen ikke er samme som for forsøkene med heft. Årsaken er at under forsøkene med heft dannes polyurea som ikke kan sammenlignes med PU-skum.

Grafene i figur 44 og 45 viser målte bendlaster etter kalibrering. Målte verdier for hvert enkelt forsøk er vedlagt i vedlegg H.



Figur 44: PU-skums kapasitet ved ulike tverrsnitt



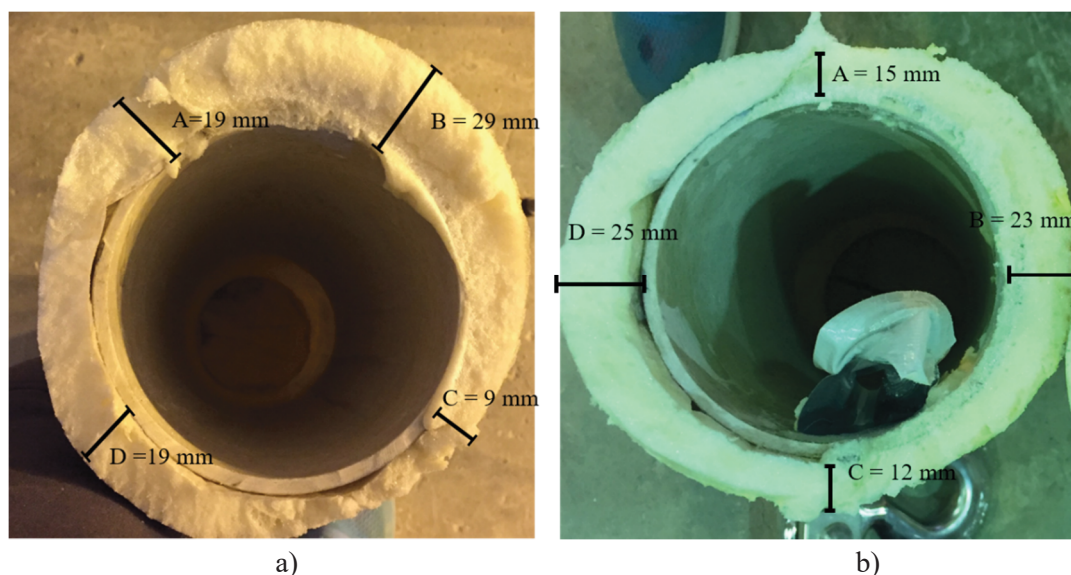
Figur 45: PU-skums kapasitet ved ulike bendvinkler

Tverrsnittet 62 mm ved 45 ° ble ikke utført, da forsøksoppsettet ikke var trygt nok til å kunne ta opp slike krefter.

Forsøket viser at både større skumtverrsnitt og bendvinkel øker på kapasiteten til skumlagte bend. Men ved større bendvinkler skal det langt mindre vanntrykk til for å få samme resultantkraft som lavere bendvinkler gir. For eksempel en resultantkraft på 1 kN i et 15 ° bend tilsvarer 35 mVs, i motsetning til 12 mVs i et 45 ° bend.

7.3.1 Usikkerhetsmomenter

Den største usikkerheten i forsøket var varierende tverrsnitt i skummet (figur 46). Tverrsnittene er kalt for A, B, C og D slik at de kan sammenlignes. Bildene er tatt av forsøket med støpeform som skulle gi 12 mm skumtverrsnitt.



Figur 46: Varierende tverrsnitt i brudd med samme støpeform a) 15° bend b) 30° bend

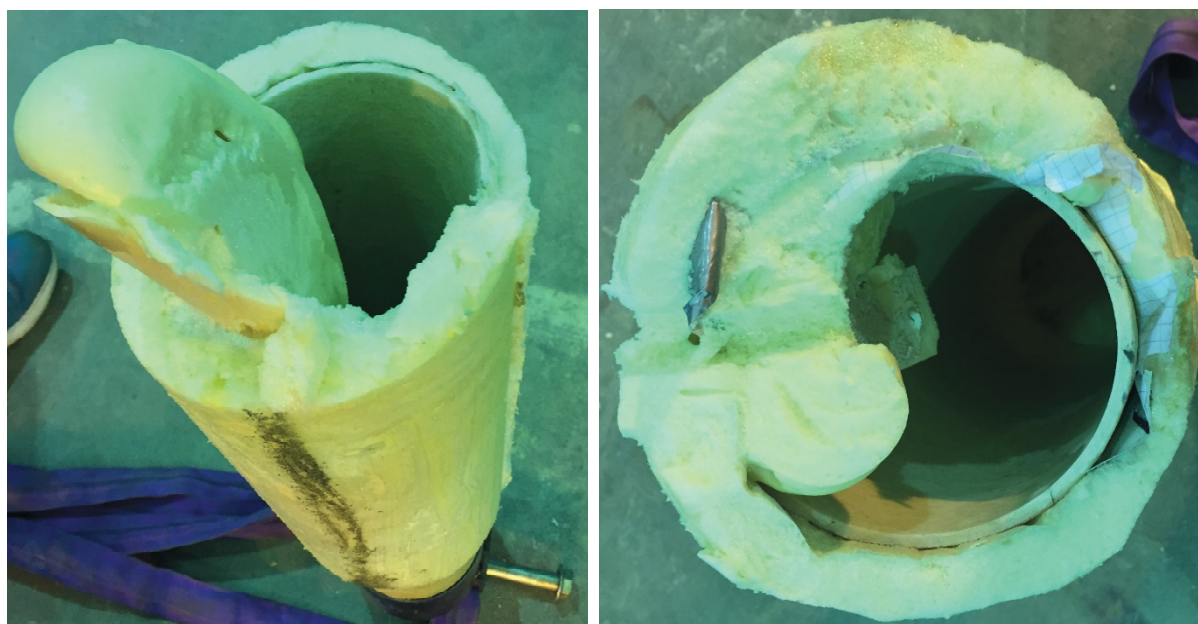
Størrelsesorden på variasjonene varierer fra forsøk til forsøk, men trenden er gjennomgående. Årsakene til det varierende tverrsnittet er feil ved kutting av rør og ekspansjonstrykk til skum. Økt mengde skum gir tilsvarende økt ekspansjonstrykk. Trykket fører til at røret løftes i formen og kan presse ut kantene på røret som ble benyttet som støpeform. Usikkerheten ble oppdaget etter første forsøk. Det ble derfor lagt større vekt på korrekte kutt og riktig mengde blandet skum i påfølgende forsøk. Figur 46 viser at variasjon fra normert tverrsnitt er størst i tverrsnitt B og D. Årsaken er at heveretningen til skummet er parallelt med tverrsnittene og ekspansjonstrykket er størst i retningen. Tabell 14 viser normert tverrsnitt og målt tverrsnitt etter brudd. I vedlegg I ligger bilder av alle tverrsnitt tatt etter forsøkene.

Tabell 14: Målte tverrsnitt etter brudd

Forsøk	Bendvinkel [°]	Normert tverrsnitt [mm]	Målt tverrsnitt [mm]
1	15	12	29-9-19-19
2	15	23	35-15-15-43
3	15	40	35-32-35-49
4	15	62	45-55-61-78
5	30	12	25-12-23-15
6	30	23	20-30-27-25
7	30	40	35-38-35-50
8	30	62	51-68-59-69
9	45	12	15-18-12-30
10	45	23	40-40-20-35
11	45	40	40-55-37-33

Et tynt skumtværsnitt kan ta opp mindre krefter enn et tykkere tværsnitt. Fordeling av krefter innad i skumtværsnittet varierer derfor kraftig. Det varierende tværsnittet vil være et betydelig usikkerhetsmoment i forsøket. Det er ikke undersøkt hvor stor innvirkningen usikkerheten har på opptak av krefter.

I forkant av forsøket ble det lagt papir rundt rørskjøten slik at skum ikke trengte inn i røret. Under forsøk 6 og 9 ble ikke papiret festet godt nok slik at skum fylte deler av røret (figur 47). Skummet som har trengt inn i røret medfører økt opptak av krefter som følge av økt mengde skum. I tillegg så flyttet skummet på metalkroken som bidrar til skjevfordeling av laster under trekking.



a)

b)

Figur 47: Skum som har trengt inn i rør. a) forsøk 6 b) forsøk 9

Skummet som har trengt inn i røret er så betydelig at urealistiske verdier i forsøk 6 og 9 forekommer. Det stilles stor usikkerhet til verdiene i nevnte forsøk.

Kranvekta som ble benyttet i forsøkene kan være et usikkerhetsmoment ved måling av verdier. Målenøyaktigheten til utstyret er ± 6 kg, forsøk med lave krefter kan ha blitt spesielt påvirket av unøyaktigheten. Forsøkene med 15° bend blir i større grad påvirket enn 45° bend, da kreftene er lavere i 15° bend. I tillegg tar det tid (≈ 2 sekunder) før måleren registrere kraften som blir satt opp (Kern, 2017). Derfor ble det under hele forsøket trukket sakte slik at måleren kunne registrere lasten.

7.3.2 Beregnede verdier

Skumprøvene som ble skåret ut fra forsøkene viser at samtlige densiteter ligger mellom $51 - 56 \text{ kg/m}^3$. Johnsen (2017) har utført tester av pour-skum med ulike densiteter. Funnene viser at strekkapasiteten til skum med densitet mellom $50 - 56 \text{ kg/m}^3$ varierer fra $500 - 600 \text{ kPa}$. Verdiene kan benyttes til å beregne bruddlast etter formel 13 – 16. Tabell 15 viser beregnede

verdier og målte verdier etter kalibrering. Det er lagt til grunn strekkfasthet $f_d = 500$ kPa, materialfaktor $\gamma_m = 1,6$ og lastfaktor $\gamma_f = 1,2$.

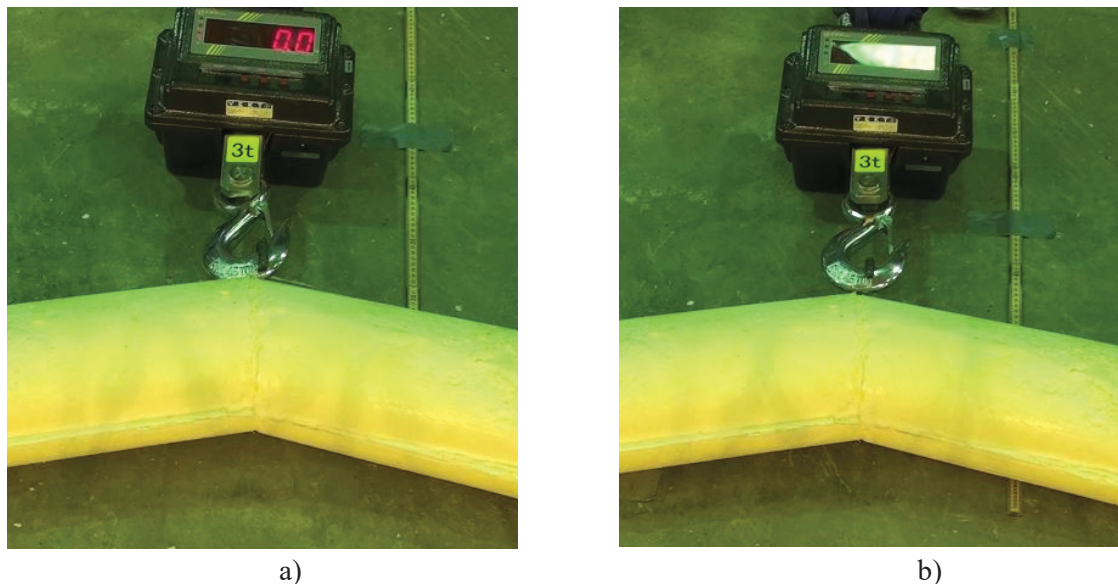
Tabell 15: Beregnede verdier av bendlast i bruddgrensetilstand

Forsøk	Vinkel [°]	Tverrsnitt [mm]	Densitet [kg/m ³]	Strekkstyrke [kN/m ²]	Beregnet bendlast [N]	Målt bendlast [N]
1	15	12	52	310	200	247
2	15	23	54	310	424	310
3	15	40	51	310	812	735
4	15	62	52	310	1436	1518
5	30	12	55	310	400	195
6	30	23	53	310	835	585
7	30	40	51	310	1625	1283
8	30	62	56	310	2861	3100
9	45	12	54	310	589	907
10	45	23	55	310	1236	1687
11	45	40	52	310	2390	2636
12	45	62	X	X	X	X

Sammenligning av resultatene fra beregnede verdier og målte verdier (tabell 15) viser forholdsvis like verdier av beregnede laster og målte laster. Det betyr at gitt beregningsmetode og material- og lastfaktorer kan legges til grunn ved dimensjonering av skumlagte bend. Derimot bidrar nevnte usikkerhetsmomentet med varierende tverrsnitt i samtlige forsøk til reduksjon i kvaliteten på sammenligningen. Dersom målte verdier hadde hatt normerte tverrsnitt, som er benyttet i beregningen, kunne lastene fått større avvik. Graden av påvirkning som følge av varierende tverrsnitt er uvisst, dermed er det begrenset hvor god kvalitet sammenligningen av beregnede verdier og målte verdier gir.

7.3.3 Observasjoner

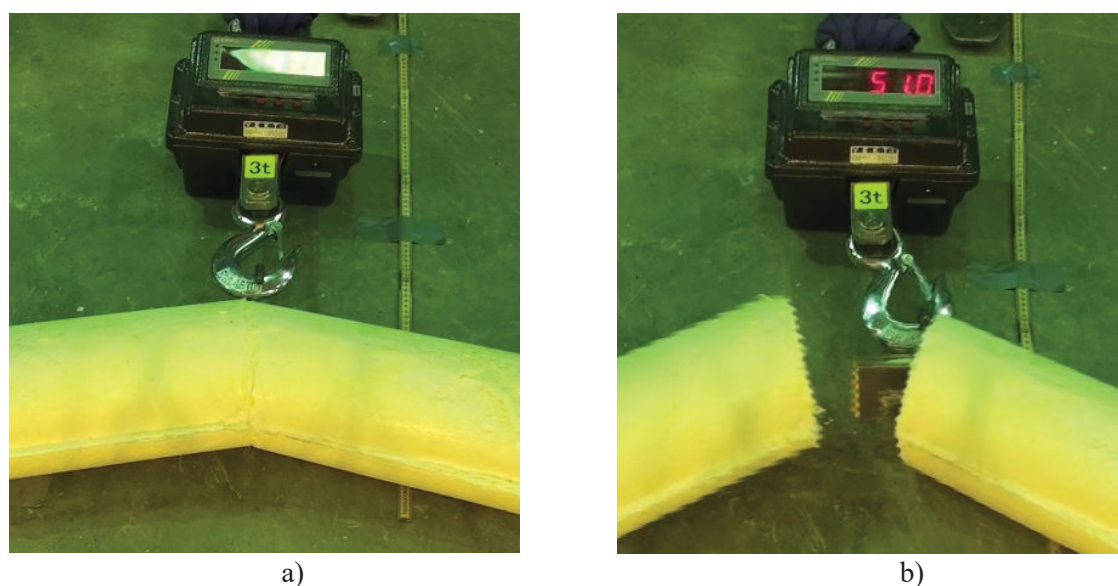
Under forsøket ble det observert at bendet hadde forflyttinger i bendkraftens retning. En del av deformasjonen kom som følge av slakk i rundslyngene. Derimot kan ikke slakk i mothold svare til hele forflyttingen da rundslyngene ble strammet opp før oppstart.



Figur 48: Deformasjoner i forsøksbend, a) før start b) rett før brudd

Fra figur 48 og analysering av film har det aktuelle bendet flyttet seg omtrent 110 mm. Deformasjonen i samtlige forsøkene varierer fra 100 mm – 250 mm, der økt tverrsnitt gir større deformasjoner. Verdiene er noe usikkert da slakket i systemet må tas med og målemetoden er unøyaktig. Men det gir en indikasjon på at skummet er elastisk og tillater forflyttinger før brudd forekommer.

Bruddet i skumtverrsnittet kommer tilnærmet momentant og uten forvarsel slik som figur 49 viser. Bildene er utklipp fra filmen til forsøket med 30 ° bend og tverrsnitt 23 mm.



Figur 49: Bruddforløpet til skumlagt bend, bildene er tatt med 0,5 sekunders mellomrom. a) før brudd b) etter brudd

Det ble tidlig antatt at bruddet oppstår som et rent strekkbrudd. Undersøkelse av bruddtverrsnittet i etterkant av forsøkene viser ingen tydelige tegn til knusning av materialet. Det beviser den tidligere antatte teorien med strekkbrudd. For metoden er dette et godt tegn da strekkstyrken i materialet er større enn trykkstyrken.

Heft mellom rør og skum er som nevnt viktig for opptak av krefter i skumlagte bend. Bendet i forsøket er intet unntak, men under forsøket ble det ikke observert tegn til vedheftbrudd. Derimot ble stålklemma på det ene røret revet av som følge av dårlig festing før forsøket. Dette beviser at røret overfører krefter som aksiale krefter som skummet tar opp. Temperaturen på røroverflaten var under samtlige forsøk omtrent 22 °C og heftkapasiteten kan da antas å være 20 kPa. Heftkapasiteten under forsøket vurderes som tilstrekkelig. Basert på funnene bør det stilles spørsmål til om utfordringen med heft til rør er et så stort problem som tidligere antatt.

Forsøkets oppsett vurderes som godt, da kreftene settes opp direkte som en punktlast i bendet. I tillegg legger forsøket opp til at alle krefter tas opp i skummet. Derimot knyttes det store usikkerheter til utførelse av forsøket. Usikkerhet med varierende tverrsnitt har størst innvirkning på resultatet. Samtlige forsøk har variasjoner fra normert tverrsnitt. Resultatene fra forsøket vurderes derfor som noe usikre.

8 Vurdering av PU-skum som forankring av bend

8.1 Overkapasitet i bend forankret med PU-skum

Utbyggingen av rørgata ved Lille Måsevann beviser at PU-skum kan benyttes som omfyllingsmasse og til forankring av bend. Per dags dato er det ingenting som tilsier fare for stopp i drift ved pumpestasjonen som følge av feil med PU-skummet. Deformasjonene som er målt i bendet våren 2017 og høsten 2016 viser heller ingen tegn til forringelse av sikkerheten. Med kunnskapen som er opparbeidet om skumlagte bend til nå, er det nødvendig at skummet i bend dimensjoneres til å fordele alle krefter. Forsøket ved NTNU er også bygget og testet basert på dette prinsippet. I felt fordeler ikke skummet alle kreftene alene, omkringliggende masser, bendmuffe og grensesjiktet mellom skum og pukk (figur 50) tar opp en betydelig andel av kreftene. Dermed får skumlagte bend i felt en overkapasitet og ekstra sikkerhet som ikke tas med i dimensjonering og planlegging.



Figur 50: Grensesjikt mellom skum og pukk under rørgata

Deformasjonsmålingene ved Lille Måsevann er en god indikasjon på overkapasiteten. Målingene viste største forflytning i stillingsgiver 4 på 0,2 mm, med så små verdier er det lite trolig at alle kreftene fordeles i skummet. Aaker (2016) beregnet for samme bend at en forflytning på 0,2 mm setter opp 18 kN i skummet over muffeskjøtene. Kreftene skummet er dimensjonert for å ta opp er 330 kN. Omtrent 1/20 del av kreftene er da tatt opp i skummet. Lovverket tillater ikke å beregne stabiliserende krefter fra passivt jordtrykk under dimensjonering med tradisjonell metode. Overkapasiteten i skumlagte bend betyr at regelverket ved dimensjonering av PU-skum nødvendigvis ikke kan benyttes på samme måte som for tradisjonell forankring. Opptaket av krefter i forankringsklosser av betong og i skumlagte bend er ulike. Betongklosser forankrer bendet med vekt slik som en gravitasjonsdam og PU-skum i bend tillater større forskyvning slik at passivt jordtrykk har innvirkning. Dimensjonering av PU-skum må på sikt ta mye større hensyn til passivt jordtrykk. Men per i dag finnes det for lite kunnskap om skumlagte bend til at skummet kan tillates å bare ta opp en andel av kreftene. Spesielt langtidsvirkninger og skummets levetid er usikkerhetsmomenter

ved valg av skumlagte bend. Enkelte polyuretaner, som benyttes til berginjeksjon, har dokumentert langtidsstabilitet opp mot 100 år ut fra akselererte tester (NFF, 2002).

8.2 Vurdering av forsøksresultater

Skalaforsøket av skumlagt bend i Vassdragslaboratoriet viste variasjoner i skumtvverrsnitt. I forsøket var dette en vesentlig usikkerhet, da fordelingen av krefter innad i skummet varierer. Et tynt skumtvverrsnitt kan ikke ta opp like mye krefter som et tykt tvverrsnitt. Dersom bruddet skjer i et tynt tvverrsnitt forplantes det videre ut i resten av skumtvverrsnittet. Under påføring av skum på bend i felt vil lokale dimensjonsavvik forekomme. Ved bygging av nye anlegg bør det holdes streng kontroll over skumtvverrsnitt. Det bør legges inn 5 % dimensjonsavvik i dimensjonering av skumtvverrsnitt slik at tvverrsnittet ikke blir mindre enn dimensjonert. I felt er det en ubetydelig kostnad å legge 100 mm mer skum, sammenlignet med kostnader ved brudd på rørgate og stopp av anlegg.

Som nevnt tidligere er heft mot røroverflaten kritisk for overføring av bendkrefter. Herdetiden i forsøkene ser ut til å ha vært en utslagsgivende faktor under utførelsen av forsøkene. Laget med polyurea som ble dannet nærmest røroverflaten ser ut til å danne styrke tregere enn resten PU-skum. Påstanden er kun basert på observasjoner under forsøkene i laboratoriet og ikke på tester av materialstyrke til polyurea.

Samtlige resultater med herdetid på en time er misvisende lave, og kan dermed heller ikke benyttes til å kunne si noe definitivt om skummetts heftkapasitet ved temperaturer under 22 °C. Basert på funn fra forsøk i laboratoriet anbefales det at bend som skal forankres med skum, enten må varmes opp til over 40 °C, eller varmes til 22 ° og få tilstrekkelig herdetid. Kostnadmessig er mest gunstig løsning å varme røret til 22 °C og la skummet herde over lengre tid.



Figur 51: Eksempel på metode for oppvarming av rør; overbygd telt og varmluft fra kokoverk

Heft mellom skum og rør er ikke avhengig av skummets tykkelse. Det betyr at dersom det påføres et tykkere lag skum økes ikke heftkapasiteten. Forankring av bend med PU-skum kan da kun benyttes ved anlegg med bendkrefter opp til en viss størrelse. Det bør stilles spesiell varsomhet dersom skummet skal benyttes til høytrykksanlegg.

Beregninger av vedheftsbrudd som Multiconsult har utført til et av bendene ved Lille Måsevann, viser en sikkerhetsfaktor $s = 18$. Her er det benyttet heftkapasitet $\tau = 170$ kPa, som er basert på tidligere kjent teori. Dersom det skal være fare for vedheftsbrudd ($s = 1$) viser beregningene at heftkapasitet må være $\tau = 10$ kPa. Beregningen er utført et spesifikt bend ved Lille Måsevann og kan ikke betraktes som et generelt funn. Men det tydeliggjør at heftkapasiteten fortsatt kan være tilstrekkelig ved $\tau = 10$ kPa, som er tilsvarende målte verdier i forsøket.

8.3 Økonomisk gevinst og regelverk

Småkraftverk blir ofte bygget i områder langt fra allfarvei, lang transport av betong er da uunngåelig. I tillegg kan siste del av transporten måtte utføres med helikopterløft. Inntransportering av materialer blir da kostbart. Ettersom skummet ekspanderes 20 – 30 ganger under reaksjonen blir transportkostnadene langt billigere enn ved transport av betong. Komponentene til PU-skum fås tilsendt som en eller to leveranser og lagres over tid på anlegget. Dersom de lagres rett er det ingen fare forringelse av kvalitet. Blandingen av skummet utføres i felt som gjør logistikken enkel på anlegget. Denne besparelsen i transport- og logistikkostnader medfører en økonomisk gevinst å benytte PU-skum til forankring av bend. Det anbefales at skummet også anvendes til omfyllingsmasse på en vesentlig del av rørgata. Årsaken er kostbart pumpe-system som benyttes til påføring av skum, omtrent 300 000 – 400

000 NOK (SprayFoamSystems, 2017). Kostanden vil være investeringskostnad for entreprenør, men dersom utstyret vedlikeholdes kan det benyttes på flere prosjekter. Hele pumpesystemet og to beholdere med komponentene får plass inne i en standard konteiner (figur 52).



Figur 52: Konteiner med pumpeutstyr og beholdere med polyol og isocyanate

Regelverket rundt forankring av bend til småkraftverk er basert på bruk av betongklosser. Både lovverket, retningslinjene og dimensjoneringsprinsipper er bygget rundt betongklosser. Da regelverket ble skrevet fantes det ingen andre gode metoder som kunne benyttes til forankring av bend. Imidlertid er regelverket formulert slik at nye metoder kan tas i bruk dersom den oppfyller kravene.

Ved horisontale og vertikale retningsendringer i rørtraséen oppstår det bendkrefter som kan bli betydelige. Kravet er at rør skal ligge i ro uten deformasjoner. Ved bendkrefter større enn tillatt kan for eksempel rørene stabiliseres med betongfundamenter. (Elstad, et al., 2011, s. 25)

Her brukes betongklosser som et eksempel på hvordan rørene kan stabiliseres. PU-skum til forankring av bend må oppfylle kravene satt i forskriftene og få godkjenning fra NVE om metoden skal benyttes på anlegg over klasse 0. Resultatene i forsøkene utført i forbindelse med Lille Måsevann kan legges til grunn ved planlegging og videreutvikling av metoden på nye prosjekt.

Basert på erfaringer og funn i oppgaven vurderes PU-skum til forankring av bend som et godt alternativ til tradisjonell forankring med betongkloss. Dette forutsetter at utførelsen på anlegget blir gjennomført korrekt for å oppnå god skumkvalitet. Derfor er det nødvendig at utførende har god erfaring med påføring av PU-skum.

9 Konklusjon

Det ble utført to separate målinger av deformasjoner i skumlagt bend ved Lille Måsevann med seks måneders mellomrom. Begge målinger viser en maksimal deformasjon på omtrent 0,2 mm. Deformasjonen kan betraktes som minimal, som tyder på at skummet i skumlagte bend ikke tar opp kreftene alene. Omkringliggende masser, bendmuffa og grensesjiktet mellom skum og pukk er medvirkende til opptak av krefter. Dette gir overkapasitet og dermed økt sikkerhet enn beregnet ved bruk av PU-skum til forankring av bend. Kvaliteten på målte resultater vurderes som nøyaktige.

Førsøkene av heft mellom skum og rør ble utført for å undersøke innvirkningen av overflatetemperatur på rør, herdetid, rørtype og priming av rør. Heftkapasiteten (τ) ble i størst grad påvirket av herdetid og rørets overflatetemperatur. Under samtlige forsøk med overflatetemperatur under 22 °C dannes det et tynt lag med polyurea mot røroverflaten. Bruddet i heften forekommer i nevnte polyurea-lag. Styrkeutviklingen til polyurea later til å være langt tregere enn polyuretaner etter funn i forsøkene. Resultater med temperaturer under 22 °C og herdetid på en time, vurderes derfor som misvisende og av liten relevans. Skum herdet i 14 døgn med overflatetemperatur på 22 °C ved påføring har en heftkapasitet $\tau = 182$ kPa.

I skummet som ble lagt ved rørtemperatur >40 °C ble det ikke observert polyurea. Det betyr at skummet her følger normal styrkeutvikling til PU-skum. Oppvarmingen gav umiddelbar effekt av heftkapasiteten. Forsøket viser en heftkapasitet $\tau = 171$ kPa. Forsøkets oppsett og utførelse vurderes som godt.

Det er ikke tidligere utført systematiske forsøk av bruddlast i skumlagte bend. Bendforsøket i Vassdragslaboratoriet ble utført for å undersøke kapasiteten til skum lagt ved ulike skumtvverrsnitt og bendvinkler. Oppsettet av forsøket legger opp til at kreftene i bendet settes opp som en direkte punktlast i bendet og samtlige krefter tas opp i skummet. Resultater fra forsøkene viser at økt skumtvverrsnitt og bendvinkel gir større kapasitet i skumlagte bend. Det må stilles stor usikkerhet til resultatene i forsøket da samtlige forsøk viste variasjoner fra normert tvverrsnitt. I helhet vurderes resultatene som noe usikre.

PU-skum til forankring av bend vurderes som et godt alternativ til tradisjonell forankring med betongklosser. Spesielt legges det vekt på overkapasiteten tilstede i skumlagte bend på grunn av jordtrykk fra omkringliggende masser, kraftopptak i bendmuffe og grensjiktet mellom pukk og skum. Det er derimot viktig at utførelsen gjøres på en korrekt måte for å kunne oppnå god kvalitet på skummet.

9.1 Videre arbeid

Gjennom arbeidet ved Lille Måsevann og laboratoriums forsøk er det blitt opparbeidet mye kunnskap om metoden. utfordringer som heft til rør og forankring av bend med PU-skum er undersøkt i denne oppgaven. I tillegg har Johnsen (2017) undersøkt hvordan materialets egenskaper påvirkes av vannabsorpsjon, fryse- og tineprosesser og i frossen tilstand. Det anbefales videre arbeid inneholder problemstillingene:

- Påvirkning av sur jord

- Skummet blir brutt ned av UV-stråler og løsemidler. Påvirkningen av skum i kontakt med jord som har lav PH-verdi er fortsatt ukjent. Dersom dette har en negativ innvirkning er det ugunstig for metoden.
- Levetid
 - Skummets levetid er en ukjent faktor. Dersom skummet etter kort tid mister sin styrke kan det medføre kostnader for allerede skumlagte rørgater og bend. Derfor bør det arbeides videre med å undersøke skummets levetid.
- Friksjon mellom lagt skum og omkringliggende jordmasser
 - Tidligere har det blitt undersøkt skummets skjærkapasitet dersom skummet påføres direkte mot jordmasser. Det vil si at skummet sprøytes direkte på grøfteveggen eller tømmes ned i grøftebunnen før reaksjonen starter. Da skummet ikke tåler å bli påført direkte mot fuktige overflater er det foreløpig blitt gått bort fra denne utførelsesmetoden. Dermed blir det faktiske grensesnittet mellom jord og PU-skum en glatt flate med litt ujevn fasong som jordtrykket hviler mot. Friksjonen mellom jord og PU-skum har stor innvirkning på den tillagte sikkerheten som er studert at opptrer langs rørgata og ved forankring av bend.

10 Kilder

3M, 2008. *3m*. [Internett]

Available at: <http://multimedia.3m.com/mws/media/777847O/isocyanates-3m-techupdate.pdf>
[Funnet 30 05 2017].

Aaker, S. L., 2016. *Deformasjoner i skumlagte rørgater*, Trondheim: NTNU.

Berge, S., 2011. *Materialteknologi. I*: Trondheim: NTNU.

Buzzi et al., O., 2008. Structure and properties of expanding polyurethane foam in the context of foundation remediation in expansive soil. *Mechanics of Materials*.

Covestro AG, 2016. *Polyurethanes Covestro*. [Internett]

Available at: <http://www.polyurethanes.covestro.com/en/Products/What-are-Polyurethanes/Polyols>
[Funnet 30 05 2017].

Covestro datablad, 2016. *Baytherm C-45-F-125/W*, Leverkusen: Covestro.

Covestro datablad, 2016. *Baytherm SP-42-F-9/W*, Leverkusen: Covestro.

Covestro, 2015. *Test results from Bayer Materialscience*, s.l.: s.n.

Covestro, 2016. *Telefonsamtale med Jeannette Sund* [Intervju] (28 08 2016).

Covestro, 2017. *Telefonsamtale med Göran Bergström* [Intervju] (19 04 2017).

Covestro, 2017. *Telefonsamtale med Göran Bergström* [Intervju] (03 04 2017).

Dipra, 2017. *Ductile Iron Pipe Research Association*. [Internett]

Available at: <https://www.dipra.org/ductile-iron-pipe/benefits/about-ductile-iron-pipe>
[Funnet 19 Februar 2017].

Duktus, u.d. *Duktus*. [Internett]

Available at:

http://www.duktus.com/fileadmin/Daten/BGW/PDF_PPT/prospekte/Handbuch_grabenlos_e_13.pdf

[Funnet 22 Februar 2017].

Electronics Tutorial, u.d. *Electronics Tutorial*. [Internett]

Available at: <http://www.electronics-tutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>

[Funnet 02 Mars 2017].

Elstad, I., Hartmann, R., Molle, G. & Bache, D., 2011. *Retningslinjer for stenge-og tappeorganer, rør og tverrslagsporter*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.

Future Pipe Industries, 2017. *Future Pipe Industries*. [Internett]

Available at: <http://www.futurepipe.com/products/grp/fiberstrong>

[Funnet 25 04 2017].

- Goods, S., Neuschwanger, C., Henderson, C. & Skala, D., 1998. Mechanical Properties of CRETE, a Polyurethane Foam. *Applied Polymer Science*.
- Guttormsen, O., 2016. *Vassdragsteknikk II*. Trondheim: Akademika.
- HBM, 2016. *Mounting instructions WA displacement transducer*. s.l.:HBM.
- Johnsen, N., 2017. *Legging av rørgater med PU-skum som omfylling*. Trondheim: NTNU.
- Kapps, M. & Buschkamp, S., 2004. *The production of rigid polyurethane foam*, Leverkusen: Bayer MaterialScience AG.
- Kern, 2017. *Kern-sohn*. [Internett]
Available at: <https://www.kern-sohn.com/shop/en/industrial-scales/hanging-scales-crane-scales/HFM/>
[Funnet 16 06 2017].
- Lia, L., 2017. *Forelesningsnotater, Vassdragsteknikk VK TVM4128*. Trondheim: NTNU.
- Madehow, 2017. *Madehow*. [Internett]
Available at: <http://www.madehow.com/Volume-6/Polyurethane.html>
[Funnet 18 05 2017].
- Mahmoud, M. K. & Tantawi, S. H., 2007. Effect of Strong Acids on Mechanical Properties. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 42(4), pp. 677-688.
- Maier, U. et al., 2004. *Polyurethane Processing Systems*, s.l.: Kunststoffe.
- McWane ductile, 2017. *Mcwaneductile*. [Internett]
Available at: <http://mcwaneductile.com/products/ductile-iron-pipe/>
[Funnet 18 Februar 2017].
- NFF, N. f. f. F., 2002. *Håndbok nr 1: Berginjeksjon*. Oslo: s.n.
- NPG Norge, 2011. *NPGnorge*. Oslo: Nordiske Plastrørgruppen Norge.
- NVE, 2013. *Reg. Lille Måsevatn, Lille Måsevatn pumpe, overf. bekkeinntak til Adamselv kry*, Oslo: NVE.
- Onsetcomp, 2017. *Onset*. [Internett]
Available at: <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux120-014m>
[Funnet 08 06 2017].
- Patel, M., 2016. *Adhesive strength*, Coventry: Normet.
- Pedersen, B., 2017. *Store Norske Leksikon*. [Internett]
Available at: https://snl.no/eksoterm_prosess
[Funnet 05 04 2017].
- Penstock BV, 2017. *Mailkorrespondanse med Penstock ang. resultater fra heftforsøk*
[Intervju] (19 04 2017).

Saint-Gobain, 2007. *Pamline*. [Internett]

Available at: <http://www.pamline.no/index.php/teknisk-info/skjoter>

[Funnet 20 Februar 2017].

SprayFoamSystems, 2017. *SprayFoamSystems*. [Internett]

Available at: <http://sprayfoamsys.com/store/spray-foam-equipment/graco-reactors-and-spray-foam-proportioners/hydraulic-spray-foam-proportioners/h-40/>

[Funnet 23 05 2017].

Svalesen, T. O., 2015. *Omfillingsmasser for rørgater i bratt terreng*, Trondheim: NTNU.

Thimural, M. et al., 2008. Effect of Foam Density on the Properties of Water Blown Rigid Polyurethane Foam. *Interscience*.

YLE GmbH, 2017. *Yl-e*. [Internett]

Available at: <http://yl-e.com/en/industrial-products/fittings-cutting>

[Funnet 29 05 2017].

Vedleggsliste

Vedlegg A – Forklaring på eget bidrag

Vedlegg B – Artikkel: PU-foam in buried penstocks

Vedlegg C – Veileder for bruk av polyuretanskum som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater

Vedlegg D – Datablad sprøyteskum

Vedlegg E – Datablad pour-skum

Vedlegg F – Forsøksresultater fra Covestro

Vedlegg G – Forsøksrapport fra Normet

Vedlegg H – Resultater fra bendforsøk

Vedlegg I – Bilder av bruddtverrsnitt

Vedlegg A

Forklaring på eget bidrag til artikkel og veileder

Forklaring på eget bidrag

Bidrag til "Veileder for bruk av polyuretanskum som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater" og artikkelen "PU-foam in buried penstocks"

Under arbeidet med masteroppgaven "Forankring av bend på rørgater med PU-skum" har det blitt utarbeidet en veileder for bruk av PU-skum rundt nedgravde rørgater og en artikkel som trolig skal publiseres til konferansen Hydro 2017, Hydropower & Dams.

Både veilederen og artikkelen er skrevet i samarbeid med medstudent Nina Johnsen. Veilederen ligger vedlagt i vedlegg XX og artikkelen ligger vedlagt i vedlegg XX.

Bidraget til veilederen og artikkelen følger en naturlig fordeling.

Veileder:

- Undertegnede er hovedforfatter av det som angår dimensjonering av skumlagte bend, og spesielle bestemmelser ved bruk av PU-skum i bend. I tillegg benyttes undertegnedes metode for måling av heftkapasitet som forslag til testprosedyrer i felt.
- Johnsen er hovedforfatter av forslag til testprosedyrer av PU-skum i felt, spesielle bestemmelser ved bruk av PU-skum og rør og nødvendige lasthensyn ved bruk av PU-skum.
- Resterende bidrag til veilederen er utarbeidet i samarbeid mellom forfatterne.

Artikkel:

- Undertegnede er hovedforfatter av det som angår målinger av forflytning i bend ved Lille Måsevann pumpestasjon. I tillegg står Aaker bak resultater fra forsøk med forankring av bend og heftkapasitet mellom røroverflaten og PU-skummet.
- Johnsens bidrag er erfaringer fra Lille Måsevann pumpestasjon i form av de ulike påføringsmetodene som ble gjennomført. I tillegg har undertegnede bidratt med fremgangsmåte for måling av PU-skummets strekk- og trykkfasthet, samt måling av vannabsorpsjon.
- Resterende bidrag til artikkelen er utarbeidet i samarbeid mellom forfatterne.

Trondheim 2017

Stian Løbø Aaker

Vedlegg B

Artikkel: PU-foam in buried penstocks

PU-foam in buried penstocks

N. Johnsen

Norwegian University of Science and Technology (NTNU)
7491 Trondheim,
Norway

S.L. Aaker

Norwegian University of Science and Technology (NTNU)
7491 Trondheim,
Norway

M. Kullberg

Multiconsult ASA
0276 Oslo,
Norway

G. Harris

Penstock BV
3992CK Houten,
Netherlands

T.O. Svalesen

Statkraft AS
8502 Narvik,
Norway

L. Lia

Norwegian University of Science and Technology (NTNU)
7491 Trondheim,
Norway

Introduction

The drop in Norwegian electricity prices over the last few years has reduced the potential income for new small hydro projects. The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) has in recent years approved hundreds of new small hydro projects, but many of these are no longer economically sound due to lower electricity prices. However, each year about 30 – 40 projects are still constructed. The number is expected to be stable until 2021, when the electricity certificate arrangement expires (Lia, et al., 2015).

Today, the construction of buried penstocks is based on the principle of gravel/crushed rock as backfill, and anchoring of bends with concrete thrust blocks. Often the construction of buried penstocks can account for 40 – 60 % of the total cost of a small hydro project, which are regularly located in remote areas without pre-existing connection to the road network (Lia, 2016). Therefore, the transportation of materials has to be carried out by constructing new access roads or by helicopter, which can be both time consuming and costly.

Penstock BV invented a method using polyurethane foam (PU-foam) as a replacement for gravel and rockfill. Additionally, anchoring of bends can be done with foam instead of concrete foundations. PU-foam is a two-component material, which expand at a ratio of 20:1 to 30:1 through an exothermic reaction. The method can potentially reduce investment cost and construction costs. Svalesen (2015) delivered his master thesis containing verification tests of PU-foam for buried penstocks.

The results were so promising that Statkraft Energy AS (Statkraft) initiated a research project to verify the method. The full-scale project is located in Finnmark, Norway. The project was successfully set in operation 26th of November 2016 with construction work done during the summer/fall the same year. Some more issues needs to be optimized before full commercialisation of the method.

1. The PU-foam concept

The main driving force behind the concept is to lower cost of constructing buried penstocks without lowering the safety level. At straight sections of the penstock, where the forces are small in the longitudinal direction, the foam's primary function is to act as a protective layer around the GRP-pipe. This feature allows for native soil from the excavation to be used as backfill in the trench after the foam has cured. Therefore, the foam reduces the use of gravel and crushed rock as backfill. However, the currently-tested foam cannot be applied onto wet ground and a drainage layer is required under the pipe. The thickness of the layer will vary from project to project – its main function is to avoid saturation of the gravel bed.



Figure 1 PU-foam used as backfill

The most common way of anchoring bends in buried penstocks today is by use of concrete anchoring blocks. Instead of anchoring the bends with weight from concrete, PU-foam uses the mechanical strengths to withstand the bend forces. Since PU-foam has great mechanical strength, the method allows for bends to be enveloped in foam. Through adhesion between the pipe and foam the forces acting on the penstock will be transferred directly to the foam. There are a few practical challenges that impair the adhesion, such as low surface temperature of the pipe, dirty and greasy surface and moisture on the pipe.

2. PU-foam

PU-foam is a two-component material composed of polyol and isocyanate. Polyols are chemical compounds with multiple hydroxyl groups (Covestro AG, 2016). The substance is widely used in polymer chemistry. Isocyanate is a chemical that contains at least one isocyanate group in its structure (3M, u.d.). Isocyanate reacts with chemicals containing alcohols to produce polyurethane polymers. In contact with each other, the materials will go through a chemical reaction and form polyurethanes (PU). By using accelerants, there are different reaction strategies available. The foam expands up to 30 times, and is 70 % cured 10 minutes after the initial reaction. In order for the foam to expand a blowing-agent is needed, and the most commonly used blowing-agent is water. Previously CFC-gas was used as blowing-agent, but due to the negative impact the CFC gasses have on the ozone layer, the gasses will soon be prohibited and have already fallen into disuse. Water is an eco-friendly blowing-agent where no harmful gasses are released into the atmosphere, and is therefore the best choice compared to other blowing-agents.

PU-foam is mainly divided into two types of foam; spray- and pour foam. The main difference between the types is the proportion of mixing between the components and their range of application. The different proportions yields fast or slow reaction, whereas the spray foam (≈ 2 sec) reacts a lot quicker than pour foam (≈ 30 sec). The pour foam is suitable for filling different types of formwork, and the spray foam is applied directly to the surface. Good quality PU-foam can be characterized by a homogeneous pore structure without visible pores and large cavities. The colour of the material should be creamy white.

After curing, the foam will have tensile and compressive strengths, whereas the tensile strength is larger than the compressive strength. This strength variation is caused by the anisotropic properties of the foam. The shape of the cells is a result of the rise direction – in the rise direction cells will be elongated.

Today PU-foam is used in a variety of different applications; insulation material in fridges and freezers, insulation in houses and around pipes for district heating. PU-foam is also used for correcting ground settlement and as water proofing in tunnels.

PU-foam has some limitations in terms of field conditions. If the unreacted foam comes in contact with free water, it will form polyurea. Polyurea is a by-product in the reaction with isocyanate and water, and it will cause the foam to be brittle and fragile. So, the presence of large amounts of free surface water is a "no-go" for PU-foam. Low surface temperature on the pipe (<22 °C) will cause the foam to form a thin layer of polyurea, due to energy being sucked out of the reaction, which will impair the adhesion to the pipe. Therefore, the pipe, especially in the bends, may need to be heated.

No prior findings indicate that the foam, after curing, has a negative effect on the environment (PU Nordic, u.d.). Cured foam is inert and does not react with other substances. During application of the foam, health and safety measures need to be met. The unreacted foam can block the lungs if it's breathed, and protective gear must always be worn by the operational personnel.

3. Full-scale test at Lille Måsevann

The penstock at Lille Måsevann is the first of its kind that uses PU-foam as backfill at parts of the penstock. The pumping station pipeline consists of an 1130 m long, buried DN900 GRP pipe. Approximately 1/3 of the total length, including two bends, were covered by foam. Water is pumped 31 m from Lille Måsevann to Store Måsevann – the intake reservoir for Adamselv hydropower plant. A map showing the penstock alignment can be seen in figure 2 a). On the same figure b), the penstock without PU-foam is shown.



Figure 2: a) Map of the penstock alignment b) The penstock at Lille Måsevann

The full-scale project was used as a test site to investigate which practical challenges that may arise in the field, and three different methods were used to apply the foam to the penstock. Both open and closed formwork solutions were tested, as well as application directly to the pipe. The application methods gave varying results in terms of quality, time consumption and resource usage.

A: Open formwork

The first application method used was an open formwork solution. The method was based on a mobile formwork, which could be relocated with a crane as the progression continued along the penstock. A roof was constructed over the formwork, in order to protect the pipe from precipitation.



Figure 3: a) Formwork relocated with an excavator b) Formwork placed around the penstock

B: Closed formwork

In parallel with the idea of using PU-foam as backfill, Penstock BV developed an application method with closed formwork. In principle, the formwork works as a mechanical "claw" that attaches to the pipe with a defined cross-section. After filling the closed formwork with PU-foam, the claw could be opened and relocated along the penstock.



Figure 4: a) Closed "claw" b) The "claw" is opened c) Closed framework placed around the pipe

The method requires an even and carefully levelled ground surface, in order to fit the pipe. This was a challenge in the field.

C: Applying directly to the pipe

From the three methods for application, foaming directly on to the pipe by using spray-foam was the most time efficient. As known, spray-foam has a faster reaction-time compared to pour-foam. Almost momentarily after hitting the pipe the foam expands. The method is highly mobile and requires no extra equipment to operate. Only 1-2 skilled workers are needed for application as the subsequent pictures show.



a)



b)

Figure 5: a) Spray-foam is applied to the pipe b) Only two persons are required as work force

In order to avoid excessive heat development, sectional thin layers of foam (20-30 mm) was applied. In anticipation of cooling layers, another section could be foamed. The length of the spray hose (200 m) determined the workable area, and the method gave the construction work good progression.

As the project was first of its kind, and the research on the method was scarce, the learning curve was steep. The foam that was produced at the start of the project shows large deviation compared to the final result. In summary, the three application methods are based on different principles and each bears various advantages and disadvantages. The method with direct application to the pipe provides for the best progress and predictability in the project. Besides, research by Johnsen (2017) indicate that spray-foam yields higher mechanical properties and density than pour-foam. High density foam also reduces the water absorption in the material, which makes it less exposed to freezing and thawing processes.

4. Anchoring of bends

The penstock at Lille Måsevann includes two 15° bends. Static head acting on the bends are 44 mWC. Both bends were anchored using spray-foam with direct application. Since the force acting on the bend is greater than those on the straight sections, a larger cross-section was sprayed on the bends. 300 mm of foam was used at the bends compared to 100 mm at the straight sections. In order to secure adhesion between foam and pipe, a temporary tent was built over the penstock. With the use of an air heater, the pipe was heated to a surface temperature above 22 °C. Heating the pipe indicated improved results of adhesion, but no test were conducted to quantify it.



a)



b)

Figure 6: a) application of foam at the bend b) the bend after removal of the tent

Extensometers was installed at one of the bends to monitor the displacement over time. Four displacement transducers were mounted on each side of the couplings, and encapsulated in protective half tubes of PE.

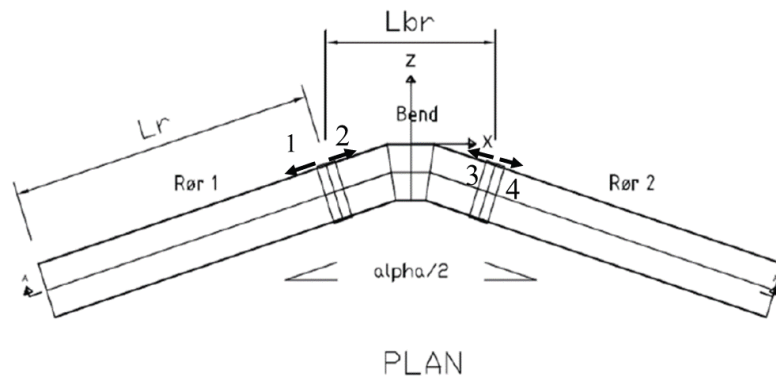


Figure 7: Placement and measured direction of the displacement transducers

Cables connected to the instruments can be connected to a logging station for measurement of the displacement. Two separate measurements, six months apart, has been carried out. Figure 8 shows measurements conducted 28.04.17, during filling of the penstock. The displacement transducers position is given on the left axis, and water pressure (black line) is given on the right axis.

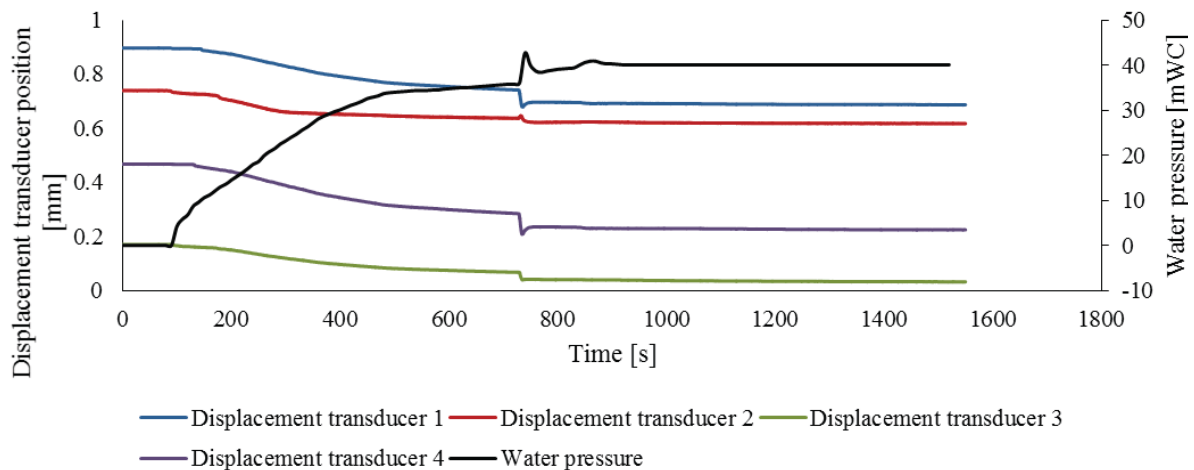


Figure 8: Deformation measurements at Lille Måsevann, 28.04.17

The results shows that the bend has very small deformation (≈ 0.2 mm). The small deformation can indicate that the forces are distributed elsewhere than in the foam. The measurements confirm that the foam distributes forces as compressive stress.

Multiconsult ASA (2016) has performed necessary safety calculations for Lille Måsevann. The aim was mainly to satisfy national requirements for pipe stability. Those requirements are developed for standard trenches with conventional backfill material. Global stability calculations for the bends was carried out as for normal concrete foundations. Passive earth pressure cannot be used as a stabilizing force according to national regulations. This arises the need for calculating tensile strength and adhesion between pipe and foam in order to securing the integrity of the foam along the pipe part that was taken in to account for global stability.

In addition, deformation and angle deflection in pipe joint had to be proven to be within requirements. Deformation calculation was carried out, stiffness of foam, backfill and in situ soil was taken in to account. As a conservative approach for first time use in penstock, tensile restraining capacity was not included. As onsite measurements shows, tensile stress in foam is not activated, proving that hydraulic force is stabilized by surrounding masses rather than through tensile restraining capacity. Real deformation in bend force direction is not measured. Further measurements to confirm calculation model is needed.

5. Laboratory testing of material quality and anchoring of bends with PU-foam

At Lille Måsevang samples of the PU-foam was taken from various locations on the penstock. Every time changes were made to the application method, ratio of mixing and temperature of the components, new samples was extracted. The samples show variation in pore structure and presumably also mechanical properties.

Johnsen (2017) presents several experiments to investigate the properties of the foam taken from Lille Måsevang. The experiments includes tests of water absorption, impacts of repeated freeze and thaw processes and mechanical strength in various conditions. For investigation of water absorption (Wa) a selection of the samples was submerged in water for eight days. The samples and their descriptions are presented in table 1.

Table 1: Description of samples tests for water absorption (Johnsen, 2017)

Sample number	Description	Volume [cm ³]	Density [kg/m ³]
7	Clearly visible cells	1000	51
17	Finer cell distribution, but still visible cells	1000	56
30	Very fine cell structure. Hard to spot the cells	1000	78

Results from the test indicate a water absorption between 4.5 vol% to 1.8 vol% from the lowest (51 kg/m³) to highest density (78 kg/m³), which corresponds to a difference of 2.7 vol%. The results are presented in figure 9. The results indicate higher water absorption with decreasing density. Samples with visible pores structure that contained a lot of air, absorbed most water.

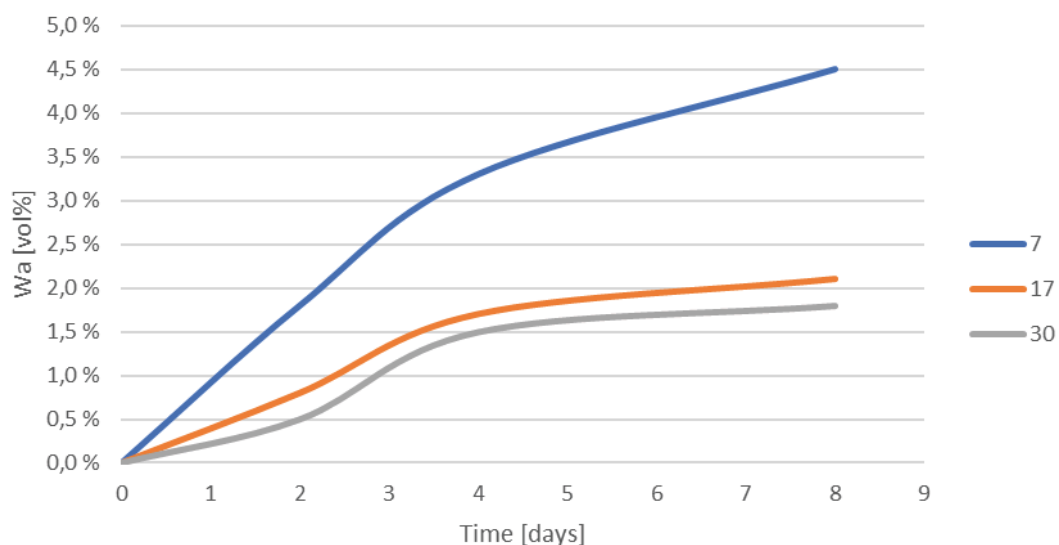


Figure 9: Results from water absorption tests (Johnsen, 2017)

Approximately 90 % of the pores in the PU-foam is supposed to be closed cells. This makes it harder for the water to penetrate the foam due to the fact the open pores are the ones that absorb water. In addition, the surface of the foam will have a membrane when direct application with spray foam is used. The membrane will prevent water absorption. In the test the samples was fully submerged with water pressure on all sides. In the field, the foam will only get exposed to water pressure from one side, and in addition that side is protected by the for mentioned membrane. Therefore, it is likely that the water absorption will be less than what the results in the test indicate.

A selection of the samples were frozen prior to testing of the material tensile and compressive strengths. In addition, a greater part of the samples went through repeated freeze and thaw cycles. The cycles represent accelerated season variations and is supposed to reflect the stresses that the PU-foam is exposed to when buried.

Tensile and compressive strengths was measured with an automated material testing machine. The results indicate no connection between the samples that were exposed to repeated freeze and thaw cycles in advance, nor the samples that was tested in frozen condition. However, tensile and compressive strengths can be linked to density and type of foam. Table 2 presents the average results from the tests for each foam type.

Table 2: Average values mechanical properties (Johnsen, 2017)

Type of foam	Tensile strength [kN/m ²]	Compressive strength [kN/m ²]
Pour	500 – 600	200
Spray	800	500

The materials ability to withstand tensile and compressive stress is so large that stresses from repeated freeze and thaw cycles have little effect on the materials strength.

Aaker (2017) focuses on anchoring of bends with PU-foam. One of the challenges that arose from the full-scale test was the lack of adhesion to the GRP pipe. As mentioned, the bend was heated to 22 °C before applying the foam. This gave better adhesion compared to earlier findings on the project. No tests were conducted to quantify the adhesion capacity in the field.

For bends anchored with PU-foam it's critical that the foam has a sufficient adhesion capacity to transfer bend loads to the foam. Based on the experience from Lille Måsevang, tests were conducted to investigate adhesion capacity in laboratory. Several parameters was investigated such as surface temperature of the pipe, curing time, type of pipe and sandblasted GRP pipe.

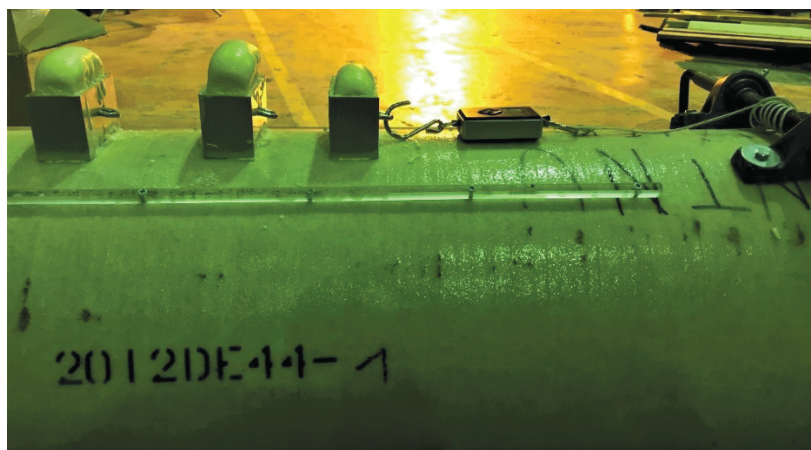


Figure 10: Setup of the adhesion test rig

As shown on figure 10, the test rig was set up with three small casting boxes with a known surface area to the pipe. A pulling mechanism was used to inflict forces on the foam. A weight was used to determine the forces acting on the casting boxes. The setup is an easy way to determine the adhesion capacity in the axial direction to the pipe. Table 3 give the main results from the tests.

Table 3: Results from adhesion capacity tests (Aaker, 2017)

Pipe	Surface temperature [°C]	Curing time [hours]	Sandblasted	Adhesion capacity [kPa]
GRP	22	1		16
GRP	22	1	X	16
GRP	22	14 days		182
GRP	40	1		170
Ductile cast iron	22	1		17

The results clearly show that curing time and surface temperature influence the adhesion the most.

No prior academic tests, reported in the literature, have been done on failure loads in bends anchored with PU-foam. The supplier have performed some initial tests that indicated reasonable compliance with Multiconsult's calculations. A scale test was conducted at NTNU, the spring of 2017. The tests consists of a $d = 199$ mm GRP-pipe, with various foam cross-sections and angles. The tested cross-sections were circular sections with 12, 23, 40 and 62 mm at bend angles of 15, 30 and 45 °. In total 11 tests were conducted.

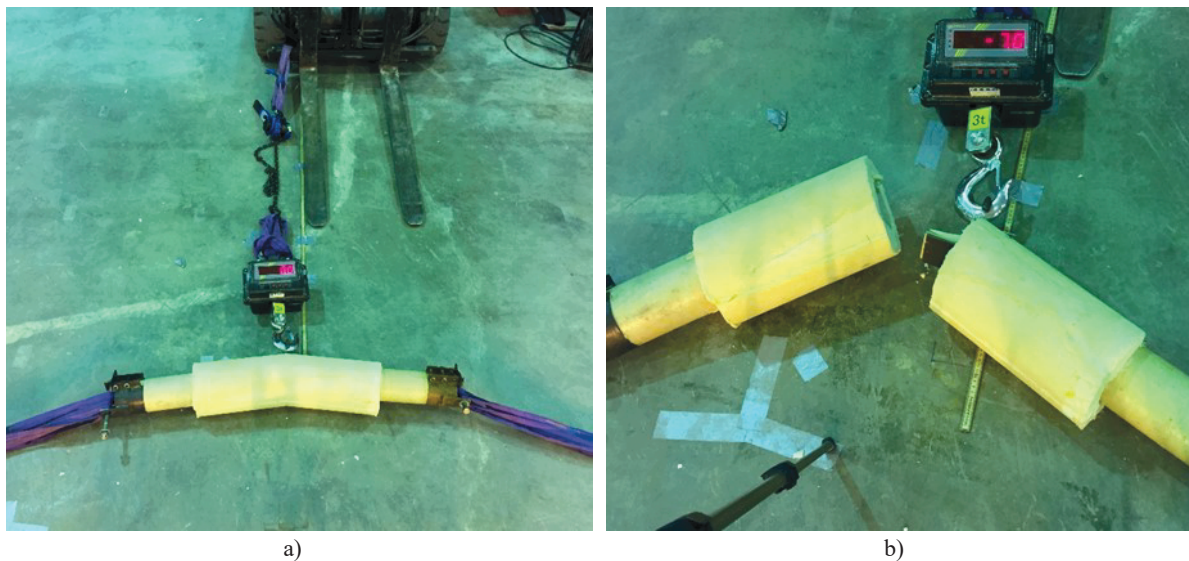


Figure 11: a) Setup of the bend test rig b) failure after test

PVC pipes was used as moulding forms to get the desired cross-sections. The test rig was set up without a bend coupling to ensure that all forces acting on the bend was distributed in the foam. A concentrated load was set up directly in the bend with a metal hook inserted in the pipes.

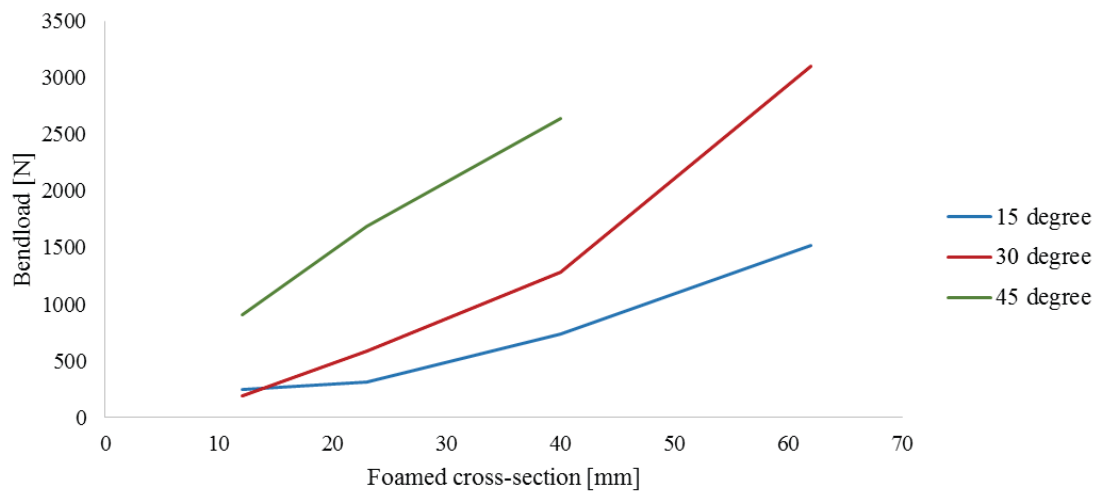


Figure 12: Failure loads in bends anchored with PU-foam (Aaker, 2017)

Test results indicate that the capacity of the foam increases with larger cross-sections and increased bend angle. By examining the fractured cross-section no crushing of the material was observed. This indicate a pure tensile rupture. For instance, a foamed cross-section of 40 mm at 30° bend had an ultimate bend load of 1 kN corresponding to 19 mWC internal pressure. However, in the field distribution of forces in the bend will not only occur in the foam. The surrounding masses, bend coupling and interface layer between the foam and drainage layer will also absorb the forces. By basing the calculation on the fact that the foam needs to be able to distribute all the forces the safety factor is increased.

6. Conclusion

At Lille Måsevang, about 300 m of buried penstock was enveloped in foam, including two bends. Challenges that arose from the project clearly shows the project was necessary for further development of the method. However, the construction of Lille Måsevang proves that the method with PU-foam as backfill works on a full-scale project.

The most time efficient application method was foam sprayed directly at the pipe. As of today, there are no signs indicating operation failure at the station due to faulty PU-foam. The displacement measurements on-site imply that the safety is not reduced.

The PU-foam absorbs water at varying rates. The water absorption seem to be related to material density. It has not been possible to find a connection between the material's mechanical properties and the different stresses (freeze/thaw and frozen condition) the material was exposed to prior to the tests. The highest value measured for tensile strength is about 800 kN/m³ and for compressive strength \approx 500 kN/m³.

Adhesion tests demonstrate that curing time and surface temperature of the pipe influence the adhesion capacity the most. If the pipe is heated to 40 °C or heated to 22 °C and cured for two weeks the adhesion capacity is between 171 – 182 kPa. The bend tests demonstrate that bend capacity is increased with larger foamed cross-section. Also, the bend angle has an influence on the measured capacity.

PU-foam as backfill and for anchoring of bends is a good alternative to traditional method. However, to obtain desired quality, precautions on-site needs to be met.

Reference

3M, n.d. *Isocyanates*. [Online]

Available at: <http://multimedia.3m.com/mws/media/7778470/isocyanates-3m-techupdate.pdf>

[Accessed 31 Mai 2017].

Aaker, S. L., 2017. *Forankring av bend på rørgater med PU-skum*, Trondheim: NTNU.

Covestro AG, 2016. *Polyols*. [Online]

Available at: <http://www.polyurethanes.covestro.com/en/Products/What-are-Polyurethanes/Polyols>

[Accessed 31 Mai 2017].

Johnsen, N., 2017. *Legging av rørgater med PU-skum som omfylling*. Trondheim: NTNU.

Lia, L., 2016. *Lecture notes from hydropower structures VK (TVM 4128)*. Trondheim: NTNU.

Lia, L. et al., 2015. The current status of hydropower development and dam construction in Norway. *Hydropower & Dams*.

Multiconsult ASA, 2016. *Teknisk plan Lille Måsevann*. s.l.:s.n.

PU Nordic, n.d. *Varmeisolasjonsmaterialer av stivt polyuretanskum*. s.l.:s.n.

Authors

Nina Johnsen – Master student at Norwegian University of Science and Technology (NTNU) at the Department of Civil and Environmental Engineering. Employed by Statkraft AS during the construction work at Lille Måsevann. Currently working in Hæhre Construction company.

Stian L. Aaker – Master student at Norwegian University of Science and Technology (NTNU) at the Department of Civil and Environmental Engineering. Employed by Statkraft AS during the construction work at Lille Måsevann. Currently working in Norsk Grønnkraft Utbygging AS.

Mattias Kullberg – Mechanical engineer at Multiconsult ASA, responsible for carrying out technical safety documentation for Lille Måsevann.

Guy Harris – Mechanical Engineer and originator of the intellectual property behind the concept. Working with full industrialisation of the concept.

Tor O. Svalesen – Project manager at Lille Måsevann for Statkraft AS. He graduated from Norwegian University of Science and Technology (NTNU) in 2015. Wrote his master thesis about polyurethane foam in penstocks and is the initiator of the project.

Leif Lia – Professor in Hydro Power Structures in the Department of Hydraulic and Environmental engineering at Norwegian University of Science and Technology (NTNU). He graduated from NTH in 1993 and his PhD was completed in 1998 at the NTNU. He worked for Grøner/ Sweco Norway AS consulting company for 11 years, seven years as head of the Hydropower department and simultaneously nine years as assistant professor (20 %) in Dam Safety at NTNU. From 2009 till now he is Professor in hydropower structures at NTNU. He is currently Vice President of ICOLD in 2014 – 2017. He has played major role in the PU-foam development project.

Vedlegg C

Veileder for bruk av polyuretanskum som omfyllingsmasse rundt
nedgravde rørgater

Veileder for bruk av polyuretanskum som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater



Utarbeidet av:
Stian Løbø Aaker
Nina Johnsen

Sammendrag

Polyuretanskum benyttes som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater, og opptrer som en erstatter for de tradisjonelle omfyllingsmassene som pukk og sprengstein. Skummet beskytter røret for ytre påkjenninger, og tar opp krefter i avvinklinger og bend. Sistnevnte egenskap er en viktig egenskap som det vektlegges stort fokus på i veilederen.

Veilederen omhandler i tillegg lastpåvirkninger som det må tas hensyn til. Det refereres både til gjeldende regelverk for tradisjonell metode, samt spesielle lastpåvirkninger knyttet til bruk av polyuretanskum.

Videre er det rettet et kapittel til komponentene som utgjør metoden. Det er fokusert på ulike typer polyuretanskum (pour-skum og sprøyteskum), og hensiktsmessig valg av rørtype ved bruk av metoden.

Nødvendig tykkelse på skumtværsnittet vil variere i ulike prosjekter. Dimensjonering av nødvendig tykkelse, både i bend og rettstrekker, er inkludert i veilederen.

Ved bruk av PU-skum er det ulike faktorer som må tas hensyn til. Faktorene gjelder spesielt nedbør og fukt på røroverflaten. Nedbør, fukt og andre faktorer er omtalt som "spesielle bestemmelser".

Ved avvinklinger og bend i rørgata er det vesentlig at skummet og røret arbeider som et materiale, og at god vedheft oppnås. Tiltak for å oppnå god heft, og spesielle bestemmelser i forbindelse med avvinklinger og bend, er beskrevet i veilederen.

Ved gjennomføring i felt er det nødvendig å kontrollere oppnådde resultater underveis i arbeidet. Kontrollering inkluderer både resultater knyttet til densitet, mekaniske egenskaper og vedheft mellom polyuretanskum og røroverflaten. Forslag til testprosedyrer for å avdekke resultatene er presentert.

Innholdsfortegnelse

1. Generelt	1
1.1 Bruk av polyuretanskum som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater	1
1.2 Definisjoner	1
2. Laster	2
2.1 Gjeldende regler	2
2.2 Spesielle lasthensyn ved bruk av PU-skum.....	3
3. Materialer	4
3.1 Polyuretanskum	4
3.2 Rørmaterialer.....	5
4. Dimensjonering	6
4.1 Dimensjonering av skumlagte bend	6
4.2 Dimensjonering av rettstrekker	7
5. Spesielle bestemmelser PU-skum	8
5.1 Lagring og transport	8
5.2 Utarbeidelse av grøftebunn ved bruk av PU-skum	8
5.3 Ved påføring av PU-skum.....	9
5.4 Etter påføring av PU-skum.....	10
6. Spesielle bestemmelser rør.....	11
6.1 Før påføring av PU-skum	11
6.2 Påføring av PU-skum	11
6.3 Etter av påføring av PU-skum.....	11
7. Spesielle bestemmer for bruk av PU-skum i bend	12
8. Testprosedyre i felt.....	13
8.1 Røroverflatens temperatur.....	13
8.2 Densitet.....	14
8.3 Mekaniske egenskaper	15
8.4 Slagtest	16
8.5 Heft.....	17
Referanser.....	19

1. Generelt

1.1 Bruk av polyuretanskum som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater

Ved utbygging av småkraftverk med nedgravd rørgate har de tradisjonelle omfyllingsmassene rundt rørene basert seg på pukk av ulik gradering og sprengstein. Den tradisjonelle metoden kan være tidkrevende, og er gjerne lite kostnadseffektiv.

Som en konkurransedyktig metode finnes en løsning der pukk og sprengstein erstattes med polyuretanskum. Polyuretanskum er en type skumplast framstilt på basis av polyuretaner (Ore, 2009). Ved å bruke polyuretanskum som omfyllingsmasse er det mulig å senke kostnadene knyttet til utbygging av rørgata, samt oppnå en reduksjon i byggetiden. Prinsippet er vist på figur 1. Figuren er hentet fra forsøk utført av Aaker (2017).



Figur 1 Prinsippfigur av PU-skum som omfyllingsmasse (Aaker, 2017)

Dersom det skal benyttes polyuretanskum som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater, anbefales bruk av veilederen. Veilederen er uavhengig av anleggets klasse.

1.2 Definisjoner

Polyuretanskum	PU-skum, et plastskum bestående av isocyanat (iso), polyol (pol) og blåsemiddel.
Blåsemiddel	Komponent som tilsettes PU-skummet for å få materialet til å ekspandere. Gjerne vann.
Sprøyteskum	PU-skum blandet med blandingsforhold POL:ISO 1:1 Skumtypen har raskere reaksjonstid sammenlignet med pour-skum.
Pour-skum	PU-skum blandet med blandingsforhold POL:ISO 1:1,25 Skumtypen har senere reaksjonstid sammenlignet med sprøyteskum.

2. Laster

2.1 Gjeldende regler

De gjeldende regler for nedgravde rørgater finnes i Damsikkerhetsforskriften §5-15 Rør og tverrslagsporter. Reglene baserer seg på bruk av tradisjonelle omfyllingsmasser, og er ikke utviklet med utgangspunkt i bruk av PU-skum. Likevel er reglene i samme grad gjeldende i de tilfeller der PU-skum blir benyttet som omfyllingsmasse.

De relevante lovene fra Damsikkerhetsforskriften er referert fra Lovdata (2009), og er gjengis i påfølgende avsnitt:

§ 5-15.Rør og tverrslagsporter

Med rør menes rør for transport av vann fra magasin til kraftstasjon, eller mellom magasiner, inklusiv fundamenter og komponenter som naturlig hører til disse rørene. Rørene kan være frittliggende, nedgravd eller innstøpt. Med tverrslagsport forstås gang- eller kjøreport for atkomst til vannvei i tunnel eller bergrom.

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*
- *Ulykkesgrensetilstand*
- *Utmattingsgrensetilstand*
- *Bruksgrensetilstand.*

Rør og tverrslagsporter med tilhørende komponenter skal kontrolleres for lastkombinasjoner med innvendig overtrykk og undertrykk, inkludert dynamisk trykk som kan være trykkstøt eller virkning av massesvingning. Rør i konsekvensklasse 2, 3 og 4 skal dimensjoneres for innvendig vakuum i ulykkesgrensetilstand. Rør og tverrslagsporter skal videre kontrolleres med hensyn til systemstabilitet med de krefter som kan opptre i konstruksjonen.

Det skal tas hensyn til produksjons- og montasjetoleranser, deformasjoner av rør med eventuelle koblinger og fundamenter, alternativt portblad og karmen, sammen med de øvrige laster konstruksjonen utsettes for.

Fundamenter og forankringsklosser skal kontrolleres for de laster de skal overføre.

Det stilles følgende konstruksjonsmessige krav til rør og tverrslagsporter:

a) Fundamentering og innstøping

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.

b) Utforming

Rør og tverrslagsporter med tilhørende komponenter skal ha atkomst for utøvelse av tilsyn og vedlikehold.

Koblinger, ekspansjonsbokser osv. skal gi sikker tetning under alle driftsforhold, og beregningene skal ta hensyn til krefter på grunn av vanntrykk, aksiale bevegelser og mulig skjevstilling eller saksing. Ekspansjonsarrangementer skal sikre at utilsiktede spenninger ikke oppstår. Pakningene skal ha tilfredsstillende langtidsegenskaper.

c) Materialkrav

Ved valg av materialer skal det tas hensyn til laststørrelser, spenningsnivå, laveste funksjonstemperatur og konsekvensklasse.

Det skal så langt som mulig benyttes standardiserte materialer eller komponenter, med dokumentert styrke, duktilitet og øvrige relevante egenskaper under alle driftsforhold.

Ved bruk av andre ikke-standardiserte eller mindre kjente materialer, når disse har sikkerhetsmessig betydning for konstruksjonen, skal materialegenskapene være spesifisert og dokumentert.

I «Retningslinjer for stenge og tappeorganer, rør og tverrslagsporter» utarbeidet av Norges vassdrags- og energidirektorats (2011), finnes tilhørende forklaringer og utdypninger på gitte regler i Damsikkerhetsforskriften. For videre utdyping av lovene gitt i Damsikkerhetsforskriften henvises det til NVEs retningslinjer.

2.2 Spesielle lasthensyn ved bruk av PU-skum

I tillegg til variable laster, permanente laster og ulykkeslaster stilles et spesielt krav til oppdrift når PU-skum benyttes som omfyllingsmasse.

Trykket øker med dybden i væsken, og det mest kritiske området er fra kl. 17-19 på rørperiferien. For å motvirke oppdriften er det ønskelig å holde volumet av skum så lavt som mulig, uten å påvirke egenskapene skummet skal tilføre med sin tilstedeværelse (Johnsen, 2016). Ved tilbakefylling av stedlige masser vil vekten fra massene motvirke oppdriften.

Beregninger for nødvendig overdekning for å motvirke oppdrift er tidligere gjennomført av Multiconsult ASA (2016). Beregningene baseres på vekten til henholdsvis røret (tomt og vannfylt), PU-skummet og jordmassene benyttet til overdekning.

3. Materialer

3.1 Polyuretanskum

PU-skum deles inn i to typer. I veilederen omtales typene henholdsvis som pour-skum og sprøyteskum. Merk at ulike leverandører kan operere med forskjellige betegnelser.

Med 'pour-skum' menes at skummet helles, eller fylles, i for eksempel en forskaling. Sprøyteskummet kan sprøytes direkte på røroverflaten. De ulike skumtypene har variasjoner i egenskapene. Grunnen til de ulike egenskapene er blandingsforholdet [liter/liter] mellom isocyanat (ISO) og polyol (POL):

Blandingsforhold pour-skum	1:1,25	(ISO:POL)
Blandingsforhold sprøyteskum	1:1	(ISO:POL)

Isocyanat og polyol er komponentene som, i tillegg til blåsemiddelet, danner PU-skummet. Komponentene er kjemiske stoffer som i kontakt med hverandre gjennomgår en eksoterm reaksjon. I kombinasjon med blåsemiddelet vil blandingen ekspandere, å utvikles til et fast materiale.

Ekspansjonstiden for de ulike typene baserer seg på datablader fra skumleverandørfirmaet Covestro AG (2016). Det gjøres oppmerksom på at andre aktører kan operere med andre verdier.

Pour-skum:

Tid for ekspansjon	330 ± 30	s
--------------------	----------	---

Sprøyteskum:

Tid for ekspansjon	12 ± 4	s
--------------------	--------	---

Skumtypenes variasjoner i ekspansjonstid indikerer ulike bruksområder:

- Pour-skum anbefales dersom det benyttes forskaling rundt røret.
Merk: Varmeutviklingen vil være svært stor. Ved høy varmeutvikling kan det føre til hulrom i materialet. Figur 2 viser eksempel på hulrom som resultat av høy varmeutvikling.
- Sprøyteskum påføres direkte på røret.
Merk: Det påføres lag i tykkelser på 20-30 mm. Laget kjøles ned før ytterligere lag påføres.



Figur 2 Hulrommene indikerer høy varmeutvikling

3.2 Rørmaterialer

Glassfiberarmert polyester (GRP), polyetylenrør (PE) og duktile støpejernsrør er rørtypene som tradisjonelt sett oftest blir benyttet ved utbygging av rørgater.

Duktile støpejernsrør skaper vedheft mot PU-skummet, men rørtypen er så robust i utgangspunktet at bruk av stedlige masser som omfylling vil være like gunstig.

PE-rørets glatte overflate gjør det nødvendig å overflatebehandle materialet for å skape vedheft. Et slikt tiltak utgjør en ekstra kostnad.

GRP-rør stiller høye krav til bruk av finere omfyllingsmasse. Røroverflaten er dessuten "grovere" sammenlignet med PE-rør, og det er derfor mulig for PU-skummet å skape vedheft med røroverflaten. I tillegg spiller kostnaden til selve rørene inn som en faktor, da GRP-rør henholdsvis utgjør det rimeligste trykkørret. På grunnlag av behovet for finere omfyllingsmasser, mulighet for vedheft, samt pris, er det derfor mest hensiktsmessig å benytte PU-skum i kombinasjon med GRP-rør.

4. Dimensjonering

4.1 Dimensjonering av skumlagte bend

Med 'bend' menes alle områder av en rørgate der det oppstår betydelige krefter som følge av horisontale og vertikale retningsendringer. Dimensjonering av skumlagte bend er basert på beregningsmetode utviklet av Multiconsult ASA (2016). Det utføres styrkeberegninger av skum og kontroll av sikkerhetsfaktorer i bruddgrensetilstand, ulykkestilstand, utmattingsgrensetilstand og bruksgrensetilstand. Til beregning av krefter i bend vises det til "Retningslinjer for stenge og tappeorganer, rør og tverrslagsporter" utarbeidet av Norges vassdrags- og energidirektorat (2011). Retningslinjene er gjeldende for skumlagte bend, som for tradisjonelt utformet forankring. Det må velges konservative last- og materialfaktorer.

I bend på rørgata skal PU-skummet fordele alle kreftene som påføres bendet *innad i materialet*. Eksempel på et skumlagt bend er vist på figur 3. Fordelingen av kreftene skal skje uten at det fører til deformasjoner på rørgata. I tillegg vil skummet fungere som et "beskyttende lag" mot omkringliggende masser. Ved dimensjonering må det legges til et dimensjonsavvik ved utføring på 5 %.



Figur 3 Eksempel på skumlagt bend

Dimensjonering av skumtverrsnitt beregnes for sikkerhet mot strekkbrudd, vedheftsbrudd mellom rør og skum, og glidning av bendet. Sikkerhet mot strekkbrudd beregnes med konservative verdier for skumstyrke, da skummet utsettes for krefter normalt på heveretningen. Beregningene må ta utgangspunkt i at skummet skal kunne fordele alle kreftene i bendet.

Vedheftsbrudd kan beskrives som at skummet rives av røret i radiell retning. Ved beregning av vedheftsbrudd skal det kun regnes med heftkapasitet av skum i 1/3 av lengden til tilstøtende rør.

Dersom det benyttes vann som blåsemiddel er kapasiteten til vedheften avhengig av overflatetemperaturen til røret når påføringen av PU-skummet gjennomføres. For å oppnå

tilstrekkelig vedheft må røroverflaten holde en temperatur over 22 °C. Merk: Rørets overflatetemperatur må tas høyde for i dimensjoneringen. Om nødvendig må det gjennomføres tiltak for å varme opp røroverflaten i forkant av påføring av PU-skummet.

Forsøk utført av Aaker (2017) ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) viser at vedheft mellom skum og rør fortsatt er noe usikkert. Det er derfor nødvendig å velge konservative verdier av vedheft. Dersom ikke annet kan dokumenteres skal det ikke velges verdier over 180 kPa i vedheftkapasitet i aksial retning. I tillegg må det utføres hyppige kontroller av vedheft mellom rør og skum på anlegget, se "8. Testprosedyrer i felt".

Velting av skumlagte bend vil ikke være reelt, da skummet påføres kontinuerlig langs hele rørgata. Bendet må derimot undersøkes for glidning. Her vil oppdriften ha en destabiliserende effekt på bendet. Sikkerhetsfaktor mot glidning i skumlagte bend kan beregnes på samme måte som ved forankring med betongfundament.

4.2 Dimensjonering av rettstrekker

Med rettstrekker menes de rørlengdene som ikke har horisontale eller vertikale retningsendringer. Figur 4 viser eksempel på et rettstrekke i rørgata.

I rettstrekker benyttes skummet hovedsakelig som en beskyttelse av røret mot omkringliggende masser. Det vil oppstå krefter langs rørgata som skummet må fordele i materialet på grunn av avvinkling i rørgata, montasjeunøyaktighet og oppdrift.

Sammenlignet med skumlagte bend, er det ikke like kritisk å oppnå vedheft mellom røroverflaten og PU-skummet i rettstrekker. Det er derfor ikke nødvendig å gjennomføre ytterligere tiltak for å varme opp røroverflaten.

Skumtværssnittet beregnes på bakgrunn av de kreftene som oppstår langs rørgata. Det anbefales at skumtværssnittet er over 100 mm. Skummet som benyttes må ha dokumenterte materialeegenskaper, og det må benyttes en sertifisert skumleverandør.



Figur 4 Rettstrekke i rørgata

5. Spesielle bestemmelser PU-skum

5.1 Lagring og transport

Komponentene som utgjør PU-skummet skal ikke eksponeres for luft under transport og lagring. Polyol er et hygroskopisk materiale, og isocyanat danner det faste stoffet polyurea i kombinasjon med luft (Kapps & Buschkamp, 2004).

Dersom polyurea dannes inne i en lagringsbeholder vil det kunne resultere i avleiringer i beholderen. Avleiringene kan resultere i tilstopping av ledninger og dyser ved senere produksjon. Det anbefales å lagre komponentene i lukkede beholdere. Se figur 5.



Figur 5 Lukket beholder for lagring av komponentene

Komponentene bør lagres slik at jevn temperatur kan opprettholdes under hele lagringsperioden. Anbefalt temperatur er over nullpunkt, men temperaturen bør ikke overstige 20 °C (Kapps & Buschkamp, 2004). Unngå at beholderne blir direkte eksponert for sollys.

5.2 Utarbeidelse av grøftebunn ved bruk av PU-skum

Det benyttes pukk eller sprengstein som et drenerende lag i grøftebunnen. Tykkelsen på laget avhenger av massene i grøfta, men tykkelsen skal som hovedregel sørge for at bunnen av skummet står tørt.

Videre utarbeides grøftetverrsnittet slik at det tilfredsstiller de krav gitt i Damsikkerhetsforskriften.

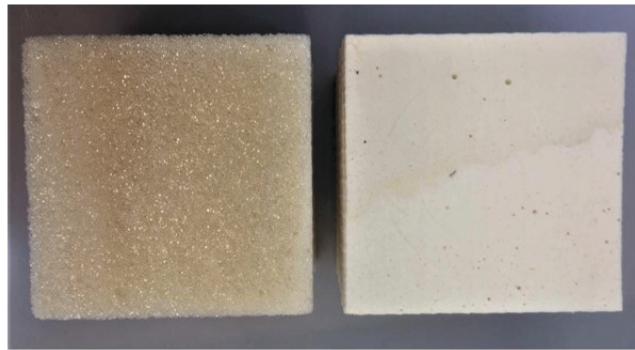
5.3 Ved påføring av PU-skum

Påføring av PU-skummet utføres av kyndig personell med relevant erfaring. Komponentenes og PU-skummetts egenskaper må kunne dokumenteres. Det forutsettes at det blir benyttet en sertifisert leverandør.

Ved påføring av PU-skum må det tas høyde for ulike faktorer:

- Røroverflaten må være fri for fukt og nedbør.
- Røroverflaten må være fri for smuss og fett.
- Dersom det stilles krav til vedheft mellom røroverflate og PU-skum, må røroverflaten holde en temperatur over 22 °C. Temperaturen registreres i forkant av påføring av skum.

Anbefalte verdier for temperatur på komponentene bør følges. Fravikelse fra anbefalt temperatur vil resultere i en uønsket porestruktur i skummet etter endt herding. Figur 6 viser skum påført med ulike temperaturer. Skumtværssnittet til venstre viser skum med store, uønskede porer. Tverrsnittet til høyre har til sammenligning den karakteristiske kremaktige fargen som er ønskelig, og materialet fremstår som "kompakt", uten synlige porer.



Figur 6 PU-skum påført med ulik temperatur på komponentene

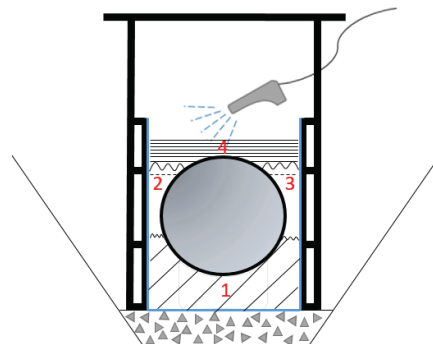
5.3.1 Bruk av pour-skum

Temperatur på komponentene, og slangens temperatur, stilles inn manuelt på den elektriske blandemaskinen. Anbefalte verdier ved bruk av pour-skum:

Isocyanat	45 °C
Polyol	50 °C
Slange for påføring	45 °C

Ved påføring av pour-skum benyttes ulike forskalingsløsninger. PU-skummet tilføres forskalingen i ulike seksjoner slik at skummet ekspanderer tett rundt røperiferien. Prinsippet er vist på figur 7.

For å unngå vedheft mellom PU-skummet og forskalingen benyttes en plastduk, eller lignende materiale, i sjiktet mellom PU-skummet og forskalingen.



Figur 7 Eksempel på forskalingsløsning

5.3.2 Bruk av sprøyteskum

Sprøyteskum påføres direkte på røret. Anbefalte verdier for temperatur på komponentene og slangen er som følger:

Isocyanat	45 °C
Polyol	45 °C
Slange for påføring	45 °C

Sprøyteskummet påføres med en jevn avstand (200-300 mm) fra munnstykket og til røroverflaten. Arbeidet utføres på en systematisert metode rundt hele rørperiferien, noe som resulterer i et jevnt tverrsnitt med skum.

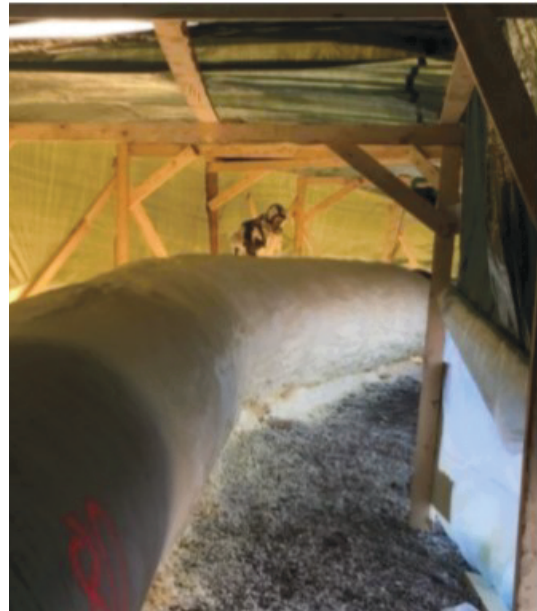
For å unngå høy varmeutvikling i skummet, påføres lag på 20-30 mm. Laget kjøles ned før neste lag påføres. Antall lag bestemmes ut fra nødvendig tykkelse på PU-skummet, basert på beregninger.

5.3.3 Helse, miljø og sikkerhet (HMS)

Ved arbeid med PU-skum må det gjennomføres forhåndsregler for de personene som er involvert i arbeidet.

Ved påføring av PU-skummet anbefales det at personene inkludert i arbeidet står i motsatt retning av vindretningen. Dette anbefales for å unngå at de involverte ikke kommer i fysisk kontakt med det uherda skummet. I verste fall kan skummet tette luftveiene, og en må derfor være veldig oppmerksom på vindretning i periodene der skummet påføres.

Ved påføring av sprøyteskum, spesielt i områder uten god ventilasjon, anbefales det bruk av friskluftsmaske. Friskluftsmaske anbefales for å unngå innpusting av støvpartikler, gasser fra PU-skummet og, i verste fall, ureagert skum. Figur 8 viser et tilfelle der sprøyteskum blir påført i en situasjon der luftsirkulasjonen er begrenset (midlertidig bygd telt), og friskluftsmaske er anbefalt.



Figur 8 Påføring av sprøyteskum innendørs

Dersom det sages, eller skjæres, i herdet PU-skum, vil det dannes små skumfragmenter. For å unngå irritasjon på øyne anbefales bruk av vernebriller..

Det finnes ingen dokumentasjon på at PU-skum med vann som blåsemiddel har negativ innvirkning på miljøet.

5.4 Etter påføring av PU-skum

For utvikling av mekaniske egenskaper anbefales en herdetid på fire døgn etter endt påføring.

Det utføres tester knyttet til densitet, styrke og vedheft i etterkant av påføringen. Testene gjennomføres i henhold til testprosedyrene beskrevet i "8. Testprosedyre i felt".

6. Spesielle bestemmelser rør

For videre forklaringer forutsettes det at det benyttes rør av typen GRP.

6.1 Før påføring av PU-skum

Transport, lagring og montering av rør utføres i samsvar med anbefalinger fra leverandør.

Røret legges på drenerende masser, slik at røret ligger stabilt og uten fare for deformasjoner og avbøyninger.



Figur 9 Grøftetverrsnitt med drenerende masser i bunn

Før påføring av PU-skum anbefales det å behandle rørene med aceton. Behandlingen gjennomføres for å fjerne fett og smuss fra røroverflaten.

Dersom det stilles krav til vedheft mellom rør og PU-skum, måles overflatetemperaturen på røret. Anbefalte verdier på temperatur er over 22 °C. Dersom røret holder lavere temperatur enn 22 °C, varmes røret opp. Metoder for oppvarming er for eksempel med varmluft, eller ved bruk av "varmeteppe".

6.2 Påføring av PU-skum

Det sørges for at røroverflaten er fri for fukt, og at røret skjermes for nedbør.

6.3 Etter av påføring av PU-skum

Skumoverflaten bør ikke eksponeres for sollys over lengre tid, da UV-stråler har en nedbrytende effekt (Buzzi, et al., 2007). Det anbefales derfor å fylle tilbake stedlige masser uten ugrunnet opphold etter at materialet har utviklet sine mekaniske egenskaper. Tilbakefylling anbefales i løpet av fjerde døgn etter skummet er påført.

Stedlige masser tilbakefylles rundt PU-skummet. Skumtype og skummets densitet setter begrensninger for anbefalte steinstørrelser. For pour-skum med densitet $\leq 50 \text{ kg/m}^3$ anbefales det å unngå steiner med spiss form, da steinene kan trenge inn i skummet å skade røret. For sprøyteskum med densitet $>70 \text{ kg/m}^3$ er ikke samme anbefaling gjeldende. Skummets høye tetthet beskytter røroverflaten i større grad.

7. Spesielle bestemmer for bruk av PU-skum i bend

Dersom PU-skum skal benyttes til forankring av bend følger spesielle bestemmelser for planlegging og utførelse. Veilederen er basert på bruk av bendmuffer og GRP-rør. Skummet og bendmuffa vil fungere som et samvirke, da bendmuffa kan fordele en viss andel av kreftene.

Som for resten av rørgata må rørets ytterflate være fri for fett, smuss og vann. For å rengjøre røroverflaten bør det vaskes med aceton eller annet løsemiddel. Etter vask skal det ikke ligge igjen rester av vaskemiddel på røret, siden løsemidler har en nedbrytende effekt på PU-skum (Buzzi, et al., 2007).

Ettersom røret overfører krefter til skummet gjennom vedheft, er det viktig at utførelsen gjøres nøye og at alle testprosedyrer følges slik at eventuelle feil oppdages. Som beskrevet tidligere er heftkapasiteten i stor grad avhengig av rørets overflatetemperatur. Bend og tilstøtende rør må derfor varmes opp til temperaturer ≥ 22 °C. Overflatetemperaturen er kritisk for å oppnå heft, noe som er vesentlig i bend.

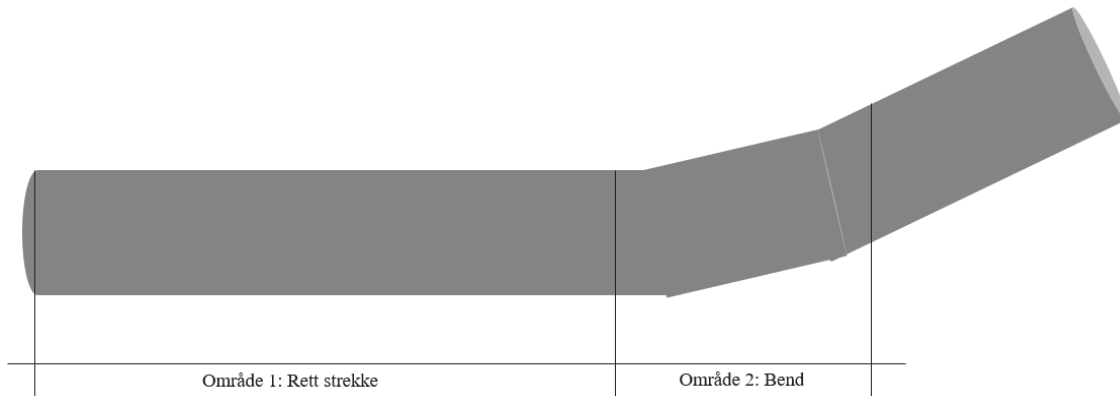
Både sprøyteskum og pour-skum kan benyttes til forankring av bend. Dersom pour-skum benyttes, bør det brukes i kombinasjon med sprøyteskum. Pour-skum anbefales i bæresonen under røret, og sprøyteskummet på resterende område rundt rørperiferien. Grunnet pour-skummetts lange reaksjonstid må det sørges for at drenerende lag med puk ikke blokkeres av skum.

Sprøyteskummet kan benyttes alene dersom det sørges for nok skum under bæresonen til røret. Det skal ikke være hulrom i området. Hulrom vil gi en ugunstig lastfordeling.

Etter at skummet er påført ventes det i minst fire døgn før stedlige masser tilbakefylles i grøfta. Tid for tilbakefylling begrunnes i utviklingen av PU-skummetts mekaniske egenskaper.

8. Testprosedyre i felt

Testprosedyrene baserer seg på at PU-skummet har ulike funksjoner i bend sammenlignet med rette strekker. Det skiller derfor mellom "Område 1: Rett strekke" og "Område 2: Bend", som vist på figur 10. Område 1 og 2 omtales videre i de ulike testprosedyrene.



Figur 10 Prinsippfigur av rørgate med bend sett i plan

For å kunne dokumentere oppnådde resultater av skummet som produseres er det viktig at følgende parametere blir kontrollert:

- Røroverflatens temperatur
- PU-skummets densitet
- Anslag av materialets mekaniske egenskaper (strekk- og trykkfasthet)
- Materialets sprøhet (evne til å motstå ytre påkjenninger i form av punktlast)
- Oppnådd vedheft i grensesjiktet røroverflate og PU-skum

Testprosedyrene for feltarbeid baserer seg på forsøk utført i "Legging av rørgater med PU-skum som omfylling" av Johnsen (2017).

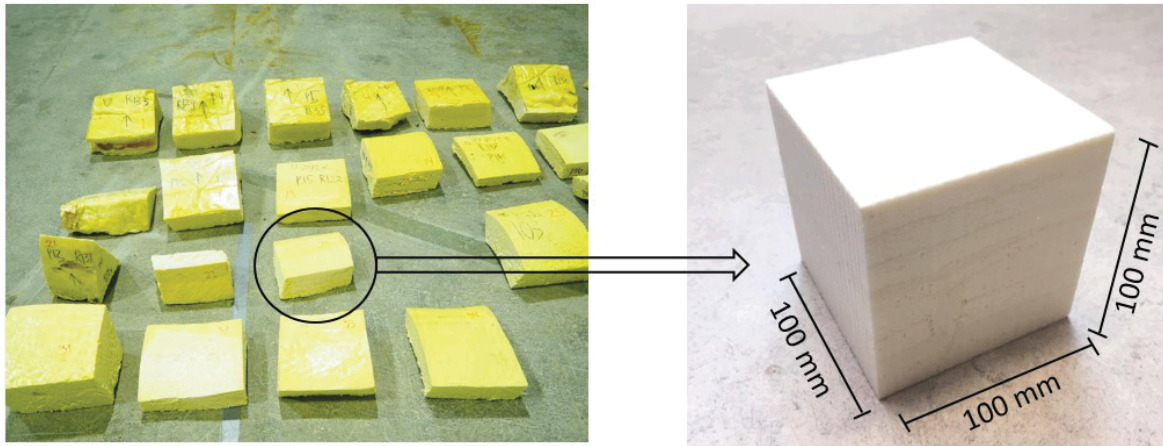
8.1 Røroverflatens temperatur

For område 1 er ikke vedheft mellom PU-skummet og røroverflaten kritisk. Det stilles derfor ingen krav til at røroverflaten i område 1 holder en temperatur over 22 °C.

I område 2 er det svært viktig å kontrollere røroverflatens temperatur, da det er ønskelig å oppnå vedheft mellom PU-skummet og røroverflaten. For å sikre tilstrekkelig må røroverflaten holde en temperatur over 22 °C. For kontinuerlig overvåkning måles temperaturen digitalt med termometer i intervaller på én meter.

8.2 Densitet

Densiteten til materialet måles ved å skjære ut prøvestykker > 100x100x100 mm. Videre finskjæres prøvene til en kubisk form som eksakt passer målene 100x100x100 mm, som vist på figur 11. Utskjæring av prøvestykker gjøres for både område 1 og område 2.



Figur 11 Utskjæring av prøvestykker for måling av densitet

Densitet regnes ut fra formelen:

$$\text{Densitet} = \frac{\text{vekt}}{\text{volum}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

For prøvestykker hentet fra pour-skum er anbefalt verdi for densitet > 55 kg/m³.

For prøvestykker hentet fra sprøyteskum er anbefalt verdi for densitet > 65 kg/m³.

8.3 Mekaniske egenskaper

Basert på materialets densitet er det ved NTNU utført forsøk av Johnsen (2017) som viser en viss sammenheng mellom densitet og materialets mekaniske egenskaper. Påfølgende figur viser verdier for strekkfasthet og trykkfasthet, og skiller mellom sprøyteskum og pour-skum.

Sprøyteskum			Pour-skum		
Densitet	Strekkfasthet	Trykkfasthet	Densitet	Strekkfasthet	Trykkfasthet
kg/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kg/m ³	kN/m ³	kN/m ³
<55			<55		
51,4	523		50,5	404	187
Standardavvik	0		50,8	529	230
Gjennomsnitt	523		52,6	548	187
60-65			55-60		
64,7	536		54,8	476	
60,0	526		Standardavvik	56	20
61,9	507		Gjennomsnitt	489	202
Standardavvik	12		65-70		
Gjennomsnitt	523		66,7	586	433
65-70			68,2	747	454
64,7	536		68,2	561	
60,0	526		Standardavvik	82	11
61,9	507		Gjennomsnitt	632	444
Standardavvik	12		>70		
Gjennomsnitt	523		71,9	628	494
>70			76,3	873	
71,9	628	494	Standardavvik	123	0
76,3	873		Gjennomsnitt	751	494
Standardavvik	123	0			
Gjennomsnitt	751	494			

Figur 12 Sammenheng mellom densitet og PU-skumets mekaniske egenskaper

På figur 12 er standardavviket for strekk- og trykkfasthet for ulike densiteter oppgitt. Merk her at det er en relativt stor spredning i verdiene og at resultatene baserer seg på prøver gjort på skum levert av Covestro AG (2016). Verdiene kan variere dersom det benyttes skum fra andre leverandører.

Med god erfaring er det tilnærmet tilstrekkelig med visuell kontroll for å fastslå de mekaniske egenskapene. Resultatene til Johnsen (2017) viser at et homogent, tett materiale med kremaktig farge og uten klar, synlig porestruktur vil, i fleste tilfeller, ha en strekkfasthet i overkant av 500 kN/m³.

Nødvendige verdier for strekk- og trykkfasthet varierer på bakgrunn av opptredende krefter i rørgata. Spesielt i område 2 (bend) må det tas hensyn til kraftopptaket.

8.4 Slagtest

Materialets elastisitet eller sprøhet er egenskaper som beskriver skummets evne til å motstå punktlast, og det evne til å beskytte røret mot ytre påkjenninger i byggefasen. For felttest kan elastisiteten anslås enkelt, med utstyr tilgjengelig på byggeplassen.

Utstyr	Informasjon	Merknad
Rør	Lengde: 2,90 m Diameter: 30 mm	Rørets diameter må være av en slik størrelse at det ikke oppstår friksjon mellom rør og bolt.
Bolt	Vekt: 160 g Areal: 200 mm ²	Bolten som er benyttet er M16X85. Arealet er området som stempler prøvestykket

Utstyret som er foreslått brukt til gjennomføring av slagtesten baserer seg på utstyr som normalt sett er tilgjengelig på byggeplass. Det er benyttet en bolt for å etterligne samme effekt som en spiss stein vil ha i virkeligheten.

Røret plasseres på skumoverflaten. I forsøket er et prøvestykke med målene 100x100x100 mm benyttet. Røret holdes horisontalt når bolten slippes i fritt fall gjennom røret. Prinsippet er vist på figur 13.



Figur 13 Gjennomføring av slagtest

Bolten fjernes, og høyden på nedsunket område måles nøyaktig.

For pour-skum anbefales det at verdien ikke overstiger 20 mm. Verdier utover 20 mm indikerer et materiale som ikke er i stand til å beskytte rørets overflate, og at skummet ikke innehar ønsket mekaniske egenskaper.

For sprøyteskum anbefales det verdien ikke overstiger 5 mm.

8.5 Heft

I felt vil det være hensiktsmessig å gjennomføre kontrolleringer av vedheft parallelt som arbeidet pågår.

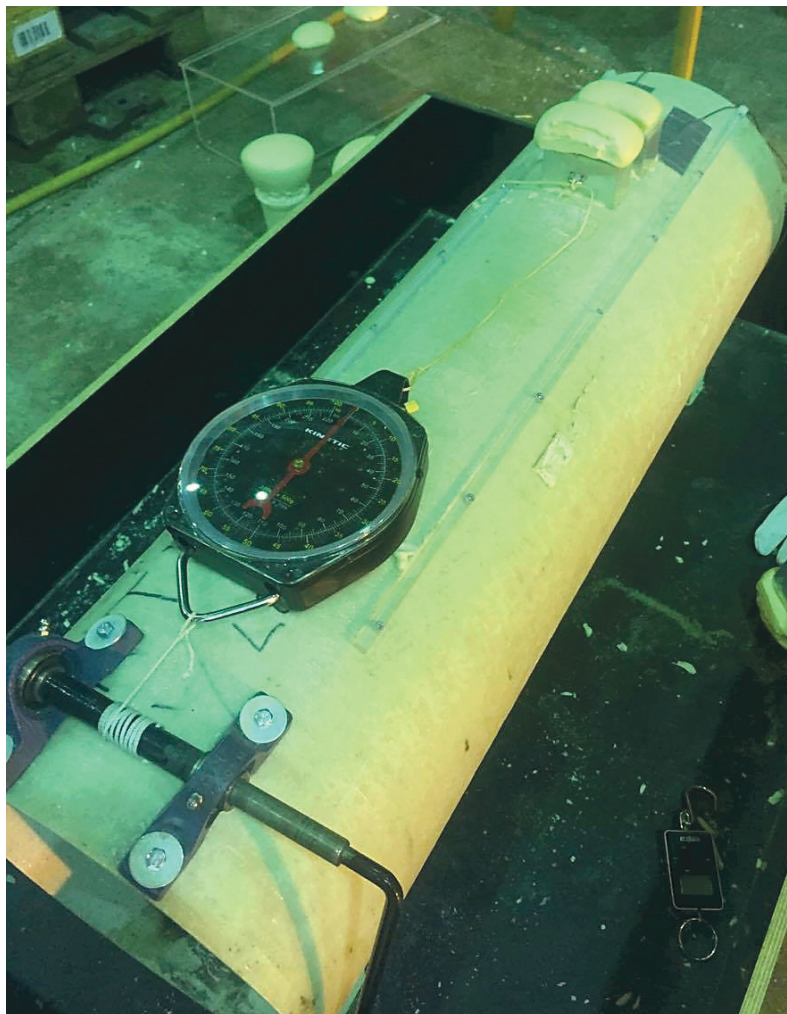
Testene bør gjennomføres kontinuerlig underveis i arbeidet, spesielt i tilfeller der forutsetningene endrer seg. Dette gjelder i tilfeller der det gjøres endringer på temperatur på komponentene, eller i tilfeller der værforholdene endrer seg og påvirker temperaturen på røroverflaten.

Unngå gjennomføring av tester på et avsidesliggende rør, da røret med stor sannsynlighet ikke er plassert på et sted med samme forhold og forutsetninger som rørgata.

For å kunne gjennomføre målinger på oppnådd vedheft, monteres en enkel testrigg på rørgata. Følgende utstyr er nødvendig:

- Vekt
- Sveiveanordning med mulighet for fastholding i røret
- Støpekasse som tilpasses rørets diameter

Prinsipielt oppsett:



Figur 14 Oppsett av heftforsøk

Sveiseanordningen festes midlertidig til røret, og fastholdes slik at anordningen ikke beveger seg horisontalt. Den tilpassede støpekassen festes til røret, og fylles med PU-skum. Ved hjelp av sveiseanordningen dras støpekassen horisontalt med en kraft som avleses på vekten.

Beregninger for vedheft baserer seg på at den tilpassede støpekassen er åpen mot røroverflaten med et gitt areal, A. Deretter påføres en aksial kraft, F, ved å rotere sveiseanordningen. Vekten viser benyttet kraft.

Heftkapasiteten beregnes ved å benytte formelen:

$$\tau = \frac{F}{A} \text{ [MPa]}$$

Der:

τ = Heftkapasitet i aksialretning [MPa]

F = Kraft i aksialretning [N]

A = Areal mot røroverflate [mm²]

Testen avdekker oppnådd heftkapasitet mellom røroverflaten og PU-skummet, og fastslår om oppnådd vedheft er innenfor gitte krav og i samsvar med hva rørgata er dimensjonert for.

Referanser

- Aaker, S. L., 2017. *Forankring av bend på rørgater med PU-skum*. Trondheim: NTNU.
- Buzzi, O., Fityus, Y., Sasaki, S. & Sloan, S., 2007. *Structure and properties of expanding polyurethane foam in the context of foundation remediation in expansive soil*. s.l.:University of Newcastle.
- Covestro AG, 2016. *Baytherm® C-45-F-125/W Filling Foam*, Leverkusen: Business Unit Polyurethanes.
- Covestro AG, 2016. *Baytherm® SP-42-F-9/W Spray Foam*, Leverkusen: Business Unit Polyurethanes.
- Johnsen, N., 2016. *Legging av rørgater med PU-skum som omfylling*. Trondheim: NTNU.
- Kapps, M. & Buschkamp, S., 2004. *The production of rigid polyurethane foam*. Leverkusen: Bayer Material Science AG, Business Development - Insulation.
- Lovdata, 2009. *Rør og tverrslagsporter*. [Internett]
Available at: <https://lovdata.no/forskrift/2009-12-18-1600/§5-15>
- Multiconsult ASA, 2016. *Teknisk plan Lille Måsevann*. s.l.:s.n.
- Norges vassdrags- og energidirektorat, 2011. *Retningslinjer for stenge- og tappeorganer, rør og tverrslagsporter*, Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Ore, S., 2009. *Polyuretanskumplast*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/polyuretanskumplast>

Vedlegg D

Datablad sprøyteskum

Baytherm[®] SP-42-F-9/W

(Trial product)

General Properties and Applications 2-component rigid low-density polyurethane foam for spray application.

The system contains no halogenated blowing agents as water (CO₂) is used as the only blowing agent. Thus the PU-system has zero ozone depletion potential (ODP=0) and zero greenhouse warming potential (GWP=0).

Isocyanate for the System	Desmodur[®] 44V20L		
	Specific gravity @ 21 °C:	1.23 ± 0.01	g/ml
	Specific viscosity @ 21 °C:	300 ± 50	mPa*s

Sampling The polyol formulation should be homogenised before samples are taken. Moisture access must be prevented.

Provisional Specification Property	Value	Unit of measurement	Method
Cream time @ 21°C	3 ± 1	s	Internal
Fibre time @ 21°C	9 ± 2	s	Internal
Tackfree time @ 21°C	12 ± 4	s	Internal
Free Rise Density @ 21°C	43.5 ± 2	g/l	Internal

Note: Measured under laboratory hand mix conditions. 100 g Polyol formulation + MDI

Other Data* Property	Value	Unit of measurement	Method
Viscosity @ 25°C	530 ± 100	mPa*s	Brookfield
Specific Gravity @ 25°C	1.10 ± 0.02	g/cm ³	Internal

* These values provide general information and are not part of the product specification

Baytherm[®] SP-42-F-9/W

(Trial product)

Packaging	Drum, IBC or truckloads.
Use before	6 months in unopened containers.
Storage	Polyol can absorb moisture from the air. Keep the container tightly closed in a cool, well-ventilated place. Store between 8 and 28°C and keep away from food and other feeding stuff.

Labeling and REACH applications This product data sheet is only valid in conjunction with the latest edition of the corresponding Safety Data Sheet. Any updating of safety-relevant information – in accordance with statutory requirements – will only be reflected in the Safety Data Sheet, copies of which will be revised and distributed. Information relating to the current classification and labeling, applications and processing methods and further data relevant to safety can be found in the currently valid Safety Data Sheet.

Directions for Processing	Ratio ISO:POL	by weight	112:100	g/g
		by volume	100:100	l/l
	Reaction profile	Hand mix @21°C	HP machine	
	Cream time	3 ± 1	±	s
	Fibre time	9 ± 2	±	s
	Tackfree time	12 ± 4	±	s
	Free rise density	43.5± 2	±	g/l
	Typical temperature of polyol:			45 - 60 °C
	Typical temperature of isocyanate:			45 - 60 °C

Note Minimum recommended density is 42 [g/l]. This means that the core density should not be less than 42 [g/l] anywhere in the sprayed foam.

The overall density of the foam including the layers is typically significantly higher than the free rise density because of the multiple layers.

The maximum thickness of the layers is 4 cm. The next layer is to be applied after the previous layer has cooled down to appr. 30°C to prevent build up of heat.



Baytherm[®] SP-42-F-9/W

(Trial product)

This is a trial product. Further information, including amended or supplementary data on hazards associated with its use, may be compiled in the future. For this reason no assurances are given as to type conformity, processability, long-term performance characteristics or other production or application parameters. Therefore, the purchaser/user uses the product entirely at his own risk without having been given any warranty or guarantee and agrees that the supplier shall not be liable for any damage, of whatever nature, arising out of such use. Commercialisation and continued supply of this material are not assured. Its supply may be discontinued at any time.

This product is not designated as „Medical Grade“ (1) and therefore shall not be considered a candidate for the manufacture of a medical device or of intermediate products for medical devices, which are intended under normal use to be brought into direct contact with the patient's body (e.g., skin, body fluids or tissues, including indirect contact to blood)*. [This product is also not designated for Food Contact (2), including drinking water, or cosmetic applications. If the intended use of the product is for the manufacture of a medical device or of intermediate products for medical devices, for Food Contact products or cosmetic applications Covestro must be contacted in advance to provide its agreement to sell such product for such purpose.] Nonetheless, any determination as to whether a product is appropriate for use in a medical device or intermediate products for medical devices, for Food Contact products or cosmetic applications must be made solely by the purchaser of the product without relying upon any representations by Covestro.

1) Please see the "Guidance on Use of Covestro Products in a Medical Application" document.
2) As defined in Commission Regulation (EU) 1935/2004.

Editor: Business Unit Polyurethanes
Covestro AG
Kaiser-Wilhelm-Allee 60
51373 Leverkusen, Germany
www.covestro.com

Contact :
Jeannette Sund
e-mail: jeannette.sund@covestro.com

Vedlegg E
Datablad pour-skum

Baytherm[®] C-45-F-125/W

(Trial product)

General Properties and Applications 2-component rigid low-density polyurethane foam.

This polyol formulation is used for cavity filling applications.

The system contains no halogenated blowing agents as water (CO₂) is used as the only blowing agent. Thus the PU-system has zero ozone depletion potential (ODP=0) and zero green house warming potential (GWP=0).

Isocyanate for the System

Desmodur[®] 44V20L

Specific gravity @ 21 °C:	1.23 ± 0.01	g/ml
Specific viscosity @ 21 °C:	300 ± 50	mPa*s

Sampling

The polyol formulation should be homogenised before samples are taken. Moisture access must be prevented.

Provisional Specification

Property	Value	Unit of measurement	Method
Cream time @ 21°C	25 ± 5	s	Internal
Fibre time @ 21°C	140 ± 10	s	Internal
Tackfree time @ 21°C	330 ± 30	s	Internal
Free Rise Density @ 21°C	47.5 ± 2	g/l	Internal

Note: Measured under laboratory hand mix conditions. 100 g Polyol formulation + MDI

Other Data*

Property	Value	Unit of measurement	Method
Viscosity @ 21°C	730 ± 200	mPa·s	Brookfield
Specific Gravity @ 21°C	1.07 ± 0.01	g/cm ³	Internal

* These values provide general information and are not part of the product specification

Baytherm[®] C-45-F-125/W

(Trial product)

Packaging	Drum, IBC or truckloads.			
Use before	6 months in unopened containers.			
Storage	Polyol can absorb moisture from the air. Keep the container tightly closed in a cool, well-ventilated place. Store between 8 and 28°C and keep away from food and other feeding stuff.			
Labeling and REACH applications	This product data sheet is only valid in conjunction with the latest edition of the corresponding Safety Data Sheet. Any updating of safety-relevant information – in accordance with statutory requirements – will only be reflected in the Safety Data Sheet, copies of which will be revised and distributed. Information relating to the current classification and labeling, applications and processing methods and further data relevant to safety can be found in the currently valid Safety Data Sheet.			
Directions for Processing	Ratio ISO:POL	by weight	143:100	g/g
		by volume	125:100	l/l
	Reaction profile	Hand mix @21°C		
	Cream time	25 ± 5		s
	Fibre time	140 ± 10		s
	Tackfree time	330 ± 30		s
	Free rise density	47.5 ± 2		g/l
	Recommended temperature of polyol:		25-35	°C
	Recommended temperature of isocyanate:		25-35	°C
Note	Minimum recommended core density is 46 [g/l]. This means that the core density should not be less than 46 [g/l] anywhere in the moulded foam.			

This is a trial product. Further information, including amended or supplementary data on hazards associated with its use, may be compiled in the future. For this reason no assurances are given as to type conformity, processability, long-term performance characteristics or other production or application parameters. Therefore, the purchaser/user uses the product entirely at his own risk without having been given any warranty or guarantee and agrees that the supplier shall not be liable for any damage, of whatever nature, arising out of such use. Commercialisation and continued supply of this material are not assured. Its supply may be discontinued at any time.

Editor: Business Unit Polyurethanes
 Covestro AG
 Kaiser-Wilhelm-Allee 60
 51373 Leverkusen, Germany
www.covestro.com

Contact :
 Jeannette Sund
 e-mail: jeannette.sund@covestro.com

Vedlegg F

Forsøksresultater fra Covestro

TEST RESULTS FROM BAYER MATERIALSCIENCE

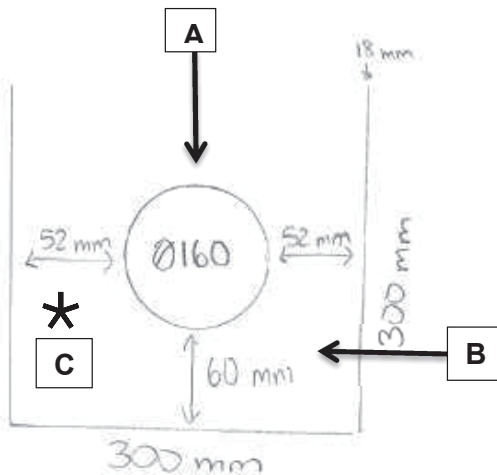
Purpose:	Trial with cavity filling PU foam in a small scale trench
PU-system:	Baytherm® CX-45-C-125/W
Customer:	Odelskraft
Production date:	16.02.2015 (Lab. in Randers)
Tested by:	Thor Iversen/Jeannette Sund

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:





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

<u>Tensile strength:</u>		
According to principals in EN 1607.		
Direction A:	369/283/326	[kPa]
Direction B:	380/385/342	
Direction C:	364/366/359	
Tot. Average:	353	
SD:	32	
<u>E-module_{tensile}</u>		
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:	10,1	
SD:	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.



2. 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:	1. 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:
Core density: 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	



Compressive strength: 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]
E-module,Compress 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]
Tensile strength: 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]
E-module,tensile 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."

Vedlegg G

Forsøksrapport fra Normet

Adhesive Strength

DP160412MP

Mehzabin Patel

May 2016

Normet UK Ltd

Unit 5 Wheler Road
Seven Stars Industrial Estate
Coventry CV3 4LB
United Kingdom

Tel. +44 (0)333 240 9966
Fax +44 (0)333 240 7744
www.normet.com

Registered in England & Wales no. 6004916
VAT no. GB 478 0700 37

CONTENTS

- 1 Introduction 2
- 2 Method..... 2
- 3 Results 2

ADHESIVE STRENGTH OF DP160412MP

1 Introduction

DP160412MP is a highly hydrophobic, rigid, cellular polyurethane foam. DP160412MP has been subjected to laboratory testing for the purpose of evaluating its adhesive strength. The tests were carried out in the Normet Global R&D Centre – Construction Chemicals. The results of this experiment is processed below.

2 Method

DP160412MP is a two-component system, reacted by mixing thoroughly together in equal parts by volume (1:1). The testing is carried out 24 hours after reacting lab-made samples of DP160412MP. Testing is carried out on DP160412MP reacted at free foam.

Testing was carried out using circular dollies with a diameter of (50 ±0.5) mm. After mixing together the two components of DP160412MP, the liquid was poured on to two testing surfaces, and the steel dollies gently bonded on the foam while it reacted. This left a foam of <1mm between the surface and dolly.

Pull of test equipment [Elcometer Pull Off Adhesion Tester] was attached to the dollies and when the foam was pulled off the surface, an indicator on the scale showed the numerical value of adhesion strength expressed in terms of the force per unit area required to remove the dolly.

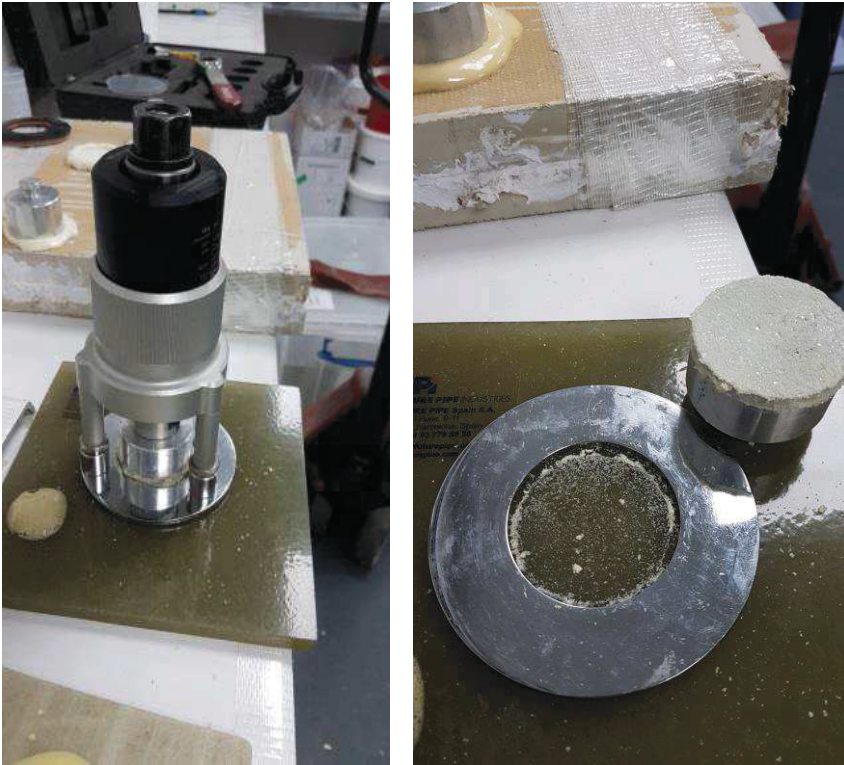
3 Results

Test Conditions: (20 ±2) °C

Product: DP160412MP

Date of testing: 26/05/2016

TEST 1: Green GRP Sample



Failure occurred between the foam and the Green GRP Sample, with a tensile strength of 0.8 MPa.

TEST 2: Curved Cream GRP Sample



50% of failure occurred between the foam and the Curved Cream GRP Sample, and 50% between dolly and foam, with a tensile strength of 0.9 MPa.

Vedlegg H

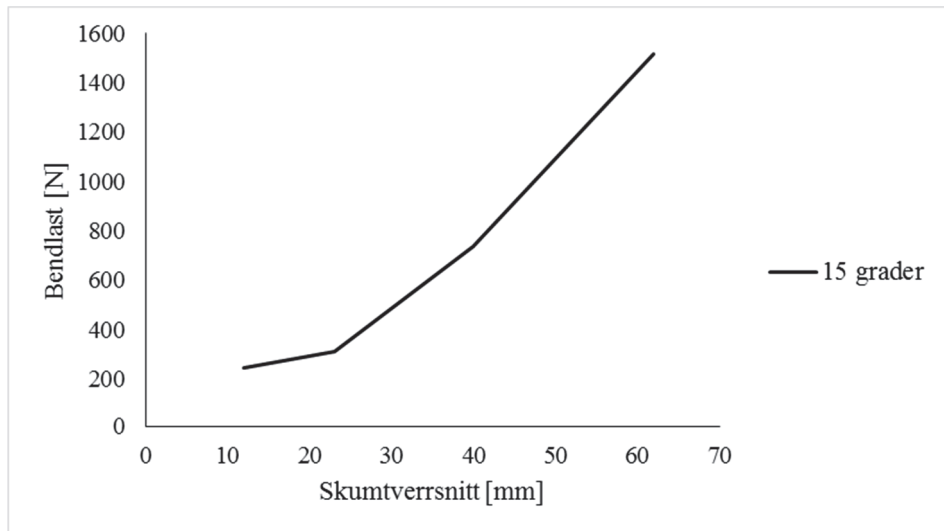
Resultater fra bendforsøk

Forsøk	Vinkel [°]	Tverrsnitt [mm]	Bendlast* [N]	Herdetid [timer]	Kalibrerings faktor	Kalibrert verdi [N]
1	15	12	235	48	1,05	247
2	15	23	265	4	1,17	310
3	15	40	628	4	1,17	735
4	15	62	1393	15	1,08	1518
5	30	12	167	4	1,17	195
6	30	23	500	4	1,17	585
7	30	40	1069	3	1,2	1283
8	30	62	2649	4	1,17	3100
9	45	12	775	4	1,17	907
10	45	23	1442	4	1,17	1687
11	45	40	2197	3	1,2	2636
12	45	62	X	X	X	X

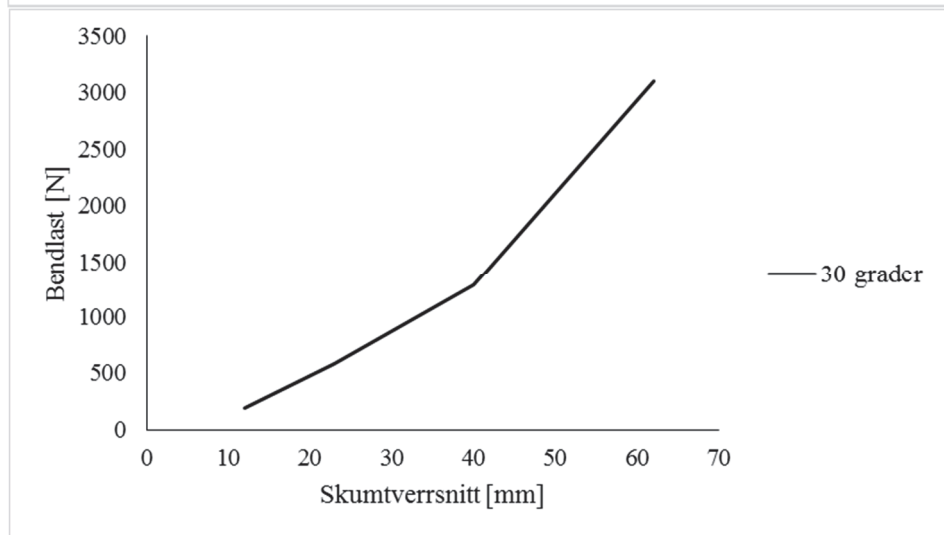
*Målt verdi ved brudd

Bendvinkel [°]

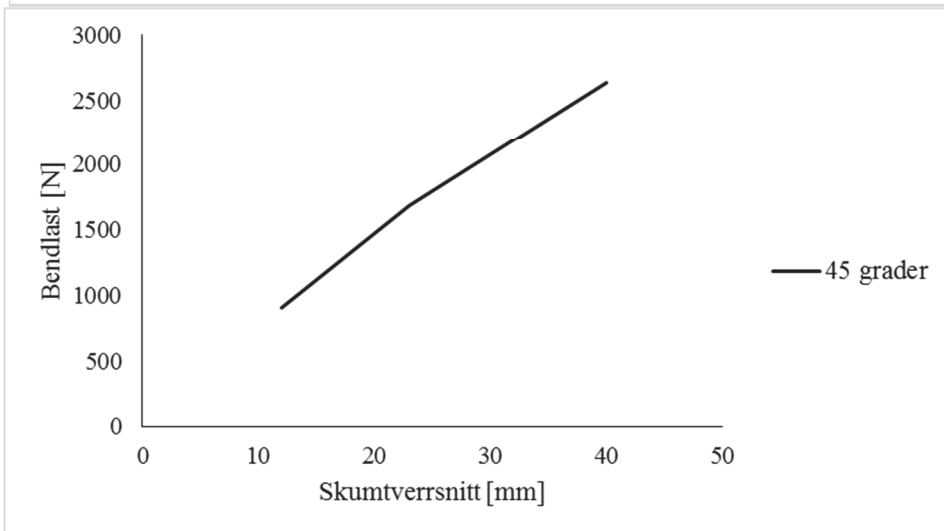
15



30

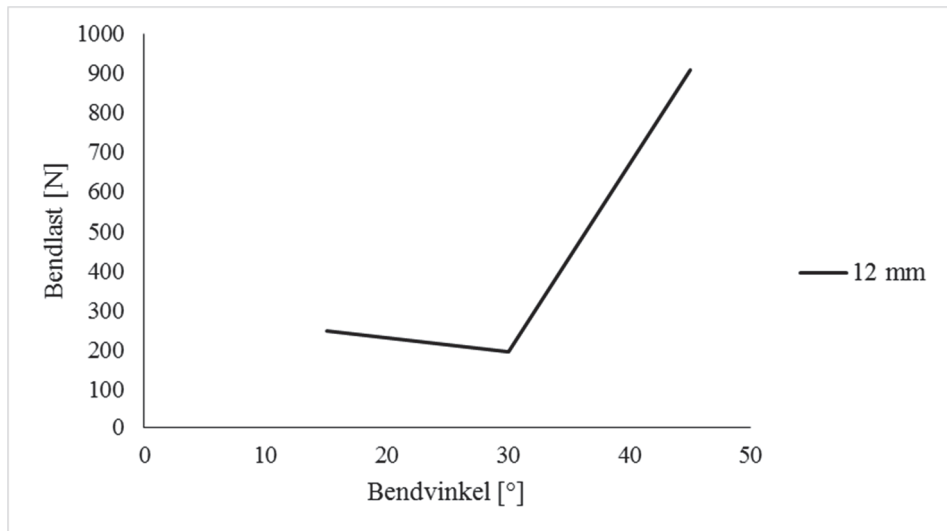


45

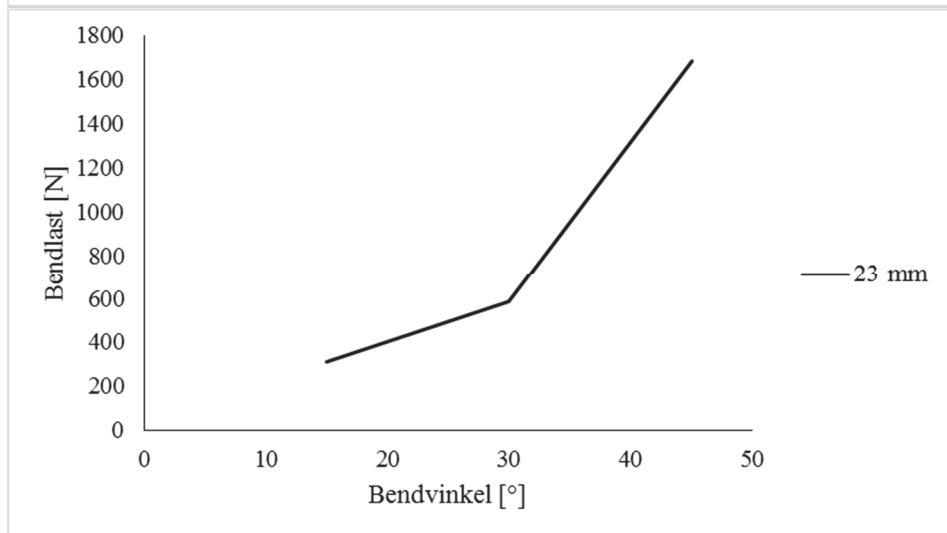


Skumtværrsnitt [mm]

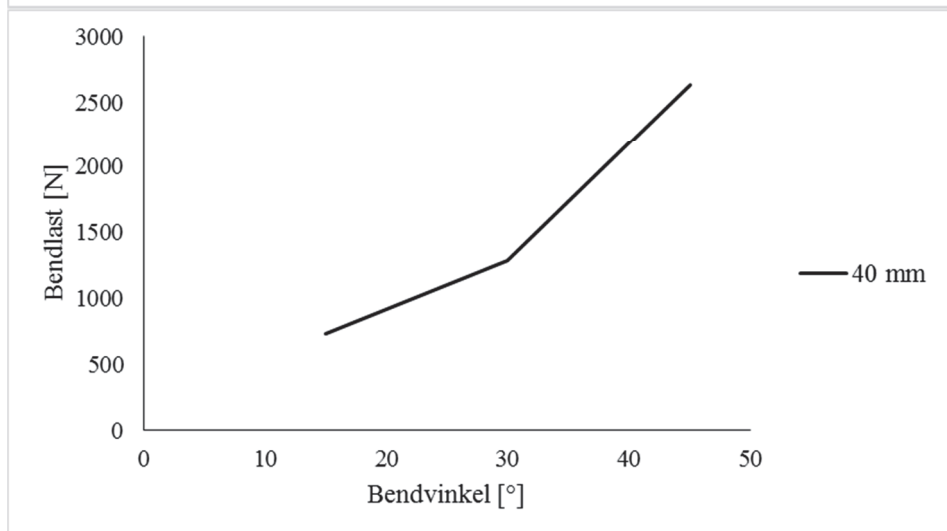
12



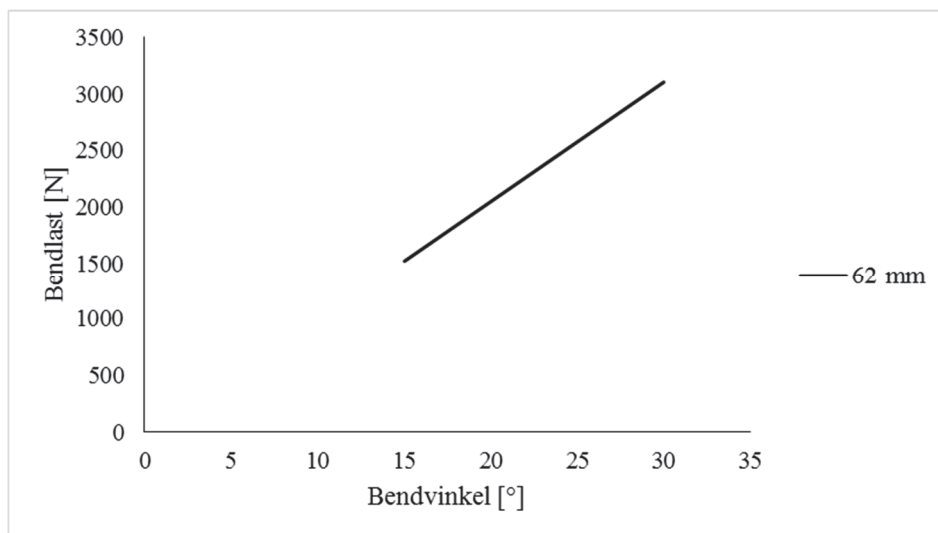
23



40



62



Vedlegg I

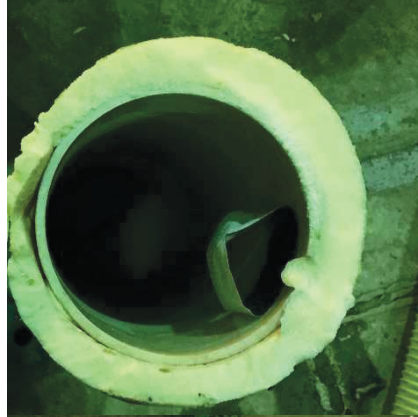
Bilder av bruddtverrsnitt

15°

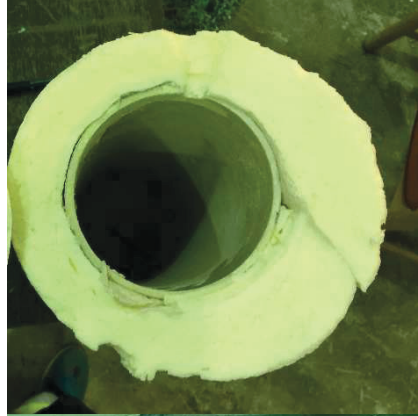
12 mm



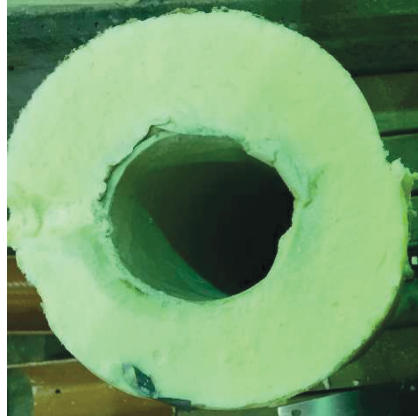
23 mm



40 mm



62 mm

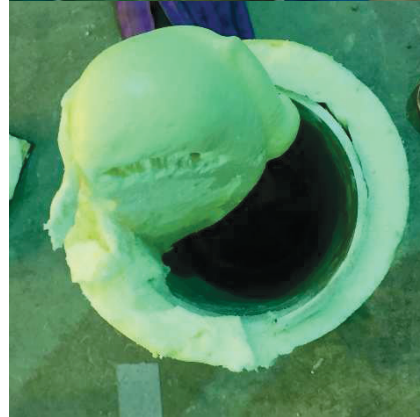


30 °

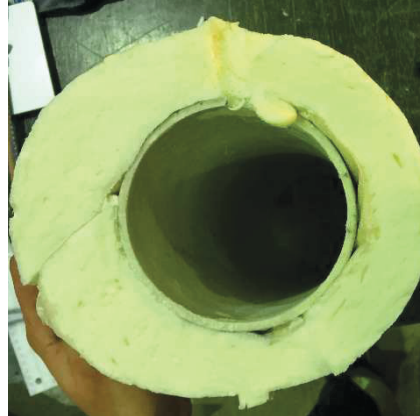
12 mm



23 mm



40 mm

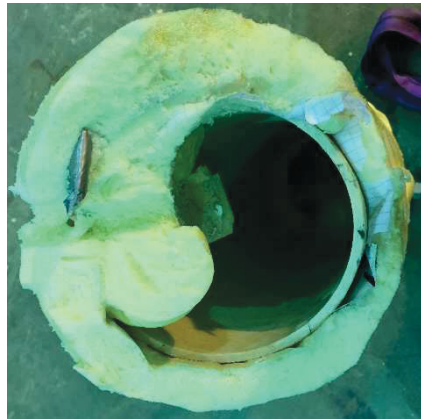


62 mm

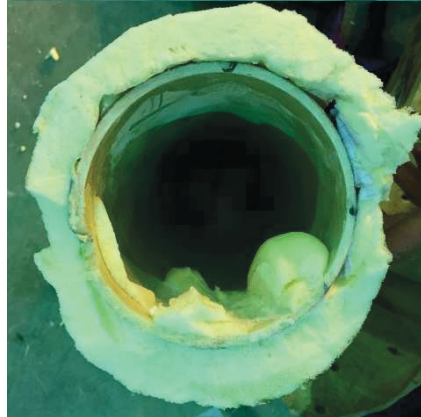


45 °

12 mm



23 mm



40 mm

