

Legging av rørgater med PU-skum som omfylling

Nina Johnsen

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: NINA JOHNSEN

Tittel: LEGGING AV RØYRGATER MED PU-SKUM SOM OMFYLLING

1 BAKGRUNN

Bruk av nedgrovne røyrgate 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 røyrgate, 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 røyrgate 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. Det eine bendet vart instrumentert og vil bli nytta til undersøkingar i ei parallell masteroppgåve.

Røyrgata vart trykksett i desember 2016 med avlesing av både eventuelle lekkasjar og deformasjonar (i eitt bend). Metoden er derfor å rekne som verifisert, men det er framleis mange forhold som må undersøkast nøyare og prinsipp som må utviklast vidare

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.

3 HOVUDPUNKT I OPPGÅVA

Arbeidet med masteroppgåva vil innehalde følgjande hovudpunkt:

- Vurdering av arbeidet som vart utført i 2016 med oppsummering og forslag til innhald i neste fullskalatest
- Testing av kvalitet på skum utført i felt i 2016 med hovudvekt på:
 - o Fuktopptak
 - o Eigenskaper når materialet er frose
 - o Utvikling av eigenskapar i akselererte fryse/tine-forsøk
- Forslag til retningslinjer for skumlegging i felt
- Forslag til testprosedyre for sikring av kvalitet på skum i felt
- Utarbeiding av manuskript til artikkel til konferansen Hydro 2017, Hydropower&Dams.

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 Stian Løbø Aaker, men det skal leverast separate masteroppgåver for kvar student.

4 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 AS, NVE, skum- og røyrleverandørar m.fl. vil vere nyttige som samarbeidspartnarar.

5 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

Ved tradisjonell utbygging av nedgravde rørgater benyttes pukk eller knuste masser som omfyllingsmasse rundt rørene. Hensikten er å sørge for at rørene ligger stabilt i grøfta, og i tillegg forhindre skader på rørene. Pukk og knuste masser er kostbart, og ofte er det en tidkrevende metode for omfylling. Penstock BV utviklet en metode der de tradisjonelle omfyllingsmassene erstattes med polyuretanskum. Den nyutvikla omfyllingsmetoden ble for første gang gjennomført i et pilotprosjekt ved Lille Måsevann pumpestasjon sommeren 2016, i regi av Statkraft Energi AS.

Masteroppgaven gir en introduksjon til arbeidet utført i pilotprosjektet, og erfaringer knyttet selve til gjennomføringen. Forsøkene utført i forbindelse med oppgaven baseres på kvalitet – både vannopptak og materialets mekaniske styrke, ved ulike påkjenninger, er testet i laboratorium. Basert på tidligere erfaringer, og resultater fra laboratorieforsøk, er det presentert et forslag til gjennomføringsmetode for neste prosjekt i fullskala.

Pilotprosjektet ved Lille Måsevann pumpestasjon var forskningsbasert. Hovedfokuset var å kartlegge en velfungerende påføringsmetode, og samtidig avdekke utfordringer knyttet til selve utførelsen av arbeidet i felt. Det ble totalt gjennomført tre ulike påføringsmetoder. Både en åpen og lukket forskalingsløsning ble testet, samt påføring direkte på røret ved hjelp av en hurtig-ekspanderende skumtype. Metodene resulterte i ulike utfordringer, og totalt sett ga påføring direkte på røret de beste resultatene med tanke på heft mellom skum og rør. Det var en bratt læringskurve i prosjektet, og skummet som ble produsert mot slutten av byggeperioden holdt mye høyere kvalitet i form av en fin, homogen masse og jevn cellestruktur.

Fra pilotprosjektet ble det hentet ut prøvestykker med polyuretanskum fra rørgata. For å kartlegge innvirkningen av gjentatte fryse-/tinesykluser og materialets egenskaper ved frossen tilstand, ble prøvestykkene utsatt for ulike påkjenninger i forkant av gjennomføringen av forsøkene. For de mekaniske egenskapene begrenset forsøkene seg til testing av strekk- og trykkfasthet. Det ble også utført forsøk knyttet til vannabsorpsjon.

Materialet absorberer vann i ulik grad. Vannabsorpsjonen er synkende for økende densitet, og densiteten synes å være hovedfaktor for om materialet har liten absorpsjon eller ikke. Det har ikke lyktes å finne en sammenheng mellom materialets mekaniske egenskaper, og de påkjenningene materialet ble utsatt for i forkant av forsøkene. Den høyeste verdien målt for strekkfasthet er i overkant av 800 kN/m^3 og for trykkfasthet $\approx 500 \text{ kN/m}^3$.

Basert på erfaringer fra pilotprosjektet og resultater fra laboratorieforsøk, er det utarbeidet et forslag til gjennomføring av neste fullskalaprojekt. Forslaget inneholder utfordringer som må tas høyde for, samt forslag til gjennomføringsmetode.

Abstract

In small hydropower projects, gravel and crushed rock are usually used as backfill around the buried penstocks. The purpose of the backfill is to ensure geotechnical stability and physical protection of the pipes in the trench. Gravel and crushed rock are expensive materials, and backfilling work is often time consuming. Penstock BV developed a method using polyurethane foam (PU-foam) as a replacement for gravel and rockfill. The newly developed method was first used in a full-scale project at Lille Måsevann Pumping station (Lille Måsevann). Statkraft Energy AS initiated the project and the construction work was carried out during the summer of 2016.

This Master's thesis is based on, and continues, a written assignment for that project. The thesis introduces the work performed at Lille Måsevann, and experiences related to the construction work. The project was research-based, with the main focus to reveal a well-functioning method of application and at the same time discover challenges related to the actual performance of the field work.

In the project at Lille Måsevann a total of three different application methods were used. Both open and closed formwork solutions were tested, as well as application directly to the pipe. The methods brought different challenges, and the project learning curve was very steep. Overall, application directly to the pipe gave the best results in relation to adhesion between foam and pipe. The method for application also resulted in foam with a fine, homogeneous mass and little variation in cell structure.

From the project, several tests were carried out on samples of PU-foam collected from the penstock. The tests are based mainly on mechanical properties and investigations into the properties of the PU-foam itself. To map the impact of repeated freeze and thaw processes, and the properties of the material at frozen condition, the samples were immersed in water and frozen prior to the tests. The tests on mechanical strength are limited to tensile and compressive strengths. Tests to reveal the material's ability to absorb water have also been performed.

The results show that the material absorbs water at varying rates, and the water absorption seems 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/m^3 and for compressive strength $\approx 500 \text{ kN/m}^3$.

Based on experience and results from laboratory trials, a proposal has been prepared for the completion of the next full-scale project. The proposal contains challenges that must be addressed, as well as proposals for implementation.

Forord

Masteroppgaven er undertegnedes avsluttende arbeid ved det toårige masterstudiet Bygg- og miljøteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven er et resultat av godt samarbeid mellom Institutt for bygg- og miljøteknikk (Vassdragsteknikk) og Statkraft Energi AS. I tillegg har både Covestro AG og Penstock BV vært inkludert i samarbeidet. Nevnte samarbeidspartnerne har vært viktige for ferdigstilling av oppgaven.

Oppgaven er utarbeidet våren 2017, med grunnlag i tidligere pilotprosjekt utført ved Lille Måsevann pumpestasjon sommeren/høsten 2016. I forbindelse med utførelse av prosjektet, rettes det en takk til ENOVA for finansiell støtte i det forskningsbaserte arbeidet.

Det er også flere enkeltpersoner som har spilt en viktig rolle for ferdigstilling av oppgaven. Erling Næss, professor ved Institutt for energi- og prosessteknikk, har vært til stor hjelp med beregninger for varmetransport i polyuretanskum. Hjelpen fra Erling Næss var vesentlig i forbindelse med forsøkene som ble gjennomført i oppgaven.

Ved utførelse av forsøkene i oppgaven tilbragte jeg mye tid ved Institutt for konstruksjonsteknikk ved NTNU. Her vil jeg rette en spesiell takk til Steinar Seehuus og Gøran Loraas – laboratorieteknikere ved Materialteknisk laboratorium. Takk for deres gode hjelp og positive innstilling.

Takk til prosjektleder, og initiativtaker, Tor Oxhovd Svalesen i Statkraft Energi AS. Ditt pågangsmot for "å dra i land" pilotprosjektet ved Lille Måsevann pumpestasjon har vært av stor betydning for utvikling av metoden. Tor Oxhovd Svalesen har også bidratt til gode diskusjoner og samtaler i forbindelse med masteroppgaven.

Det rettes også en stor takk til professor Leif Lia ved Vassdragsteknikk, NTNU. Takk for god veiledning og faglige innspill underveis i arbeidet med min masteroppgave.

Jeg vil avslutningsvis også benytte anledningen til å rette en takk til medstudent Stian Løbø Aaker. Som sparringspartnere denne våren har vi hatt mange (og lange) diskusjoner vedrørende metoden med bruk av PU-skum som omfyllingsmasse. Samarbeidet har vært viktig både for motivasjonen, og for ferdigstilling av oppgaven.

Trondheim 11.06.2017

Nina Johnsen

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	I
Abstract	III
Forord.....	V
Innholdsfortegnelse	1
Figurliste.....	3
Tabelliste	5
1. Innledning.....	7
1.1 Bakgrunn	7
1.2 Hensikt	8
1.3 Metode for utførelse og oppgavens begrensninger	8
1.4 Gjeldende lovverk	9
1.5 Tidligere gjennomført arbeid	11
2. Polyuretanskum.....	12
2.1 Grunnleggende teori	12
2.2 Styrkeegenskaper	15
2.3 Varmeoverføringsegenskaper.....	18
2.4 Kvalitet.....	23
2.5 Begrensninger.....	26
3. Gjennomføring av pilotprosjekt	28
3.1 Introduksjon til pilotprosjektet	28
3.2 Gjennomføring	31
3.3 Erfaringer	38
3.4 Vurdering av pilotprosjektet.....	41
4. Vannabsorpsjon.....	44
4.1 Bakgrunn	44
4.2 Gjeldende kunnskap og standarder	44
4.3 Metode og fremgangsmåte	45
4.4 Resultat.....	47
4.5 Diskusjon.....	49
5. Fryse-/tinesykluser	51
5.1 Bakgrunn	51
5.2 Utvalg av prøvestykker	51

5.3 Metode og fremgangsmåte	53
5.4 Resultat.....	55
5.5 Diskusjon.....	58
6. Mekaniske egenskaper	61
6.1 Bakgrunn	61
6.2 Gjeldende kunnskap og tidligere oppnådde resultater	61
6.3 Fremgangsmåte for testing av trykkfasthet	64
6.4 Fremgangsmåte for testing av strekkfasthet.....	66
6.5 Resultat trykkfasthet.....	68
6.6 Resultat strekkfasthet	73
6.7 Diskusjon.....	78
7. Veileder og testprosedyre for kvalitet i felt.....	84
7.1 Mekaniske egenskaper	84
7.2 Slagtest	87
7.3 Heft.....	89
8. Gjennomføring av neste fullskalaprojekt.....	91
8.1 Hvorfor er det nødvendig å gjennomføre ytterligere fullskalaprojekter?	91
8.2 utfordringer som må tas høyde for i neste prosjekt.....	92
8.3 Forslag til gjennomføringsmetode	93
9. Konklusjon	96
9.1 Gjennomføring av pilotprosjekt	96
9.2 Kvalitetsforsøk	96
9.3 Overvåkning av kvalitet i felt.....	97
9.4 Gjennomføring av neste fullskala prosjekt.....	97
9.5 Videre arbeid.....	98
Referanseliste	99
Vedlegg	103

Figurliste

Figur 1 Kjemisk reaksjon mellom isocyanat og polyol (Kapps & Buschkamp, 2004)	12
Figur 2 Ulike faser i framstillingen av PU-skum	12
Figur 3 a) Flytende skum med mørk farge b) Ekspandert skum med kremaktig farge	13
Figur 4 a) Eksempel på en mekanisk blandingspumpe b) Skjermen viser temperaturen	15
Figur 5 a) Densitet: 103 kg/m ³ b) Densitet: 60 kg/m ³ c) Densitet: 42 kg/m ³ (Thirumal, et al., 2008) ..	16
Figur 6 PU-skum produsert med ulike temperaturer	17
Figur 7 Prinsippfigur for varmeoverføring	19
Figur 8 Verdier for μ_{luft} og δ_{luft} (Bergman, et al., 2006)	20
Figur 9 Verdier for δ_{PU} og $C_{\text{(p,PU)}}$ (Václavík, et al., u.d.)	21
Figur 10 Verdier for C_1 og ξ_1 (Bergman, et al., 2006)	22
Figur 11 Lagringsforhold ved tette beholdere	23
Figur 12 Ufullstendig reaksjon mellom polyol og isocyanat	24
Figur 13 Undersøkelser av oppnådd heft a) Ingen/liten heft b) Indikasjon på god heft	25
Figur 14 Synlig lag med polyurea markert med sirkel	26
Figur 15 Lokasjon Adamselv Kraftverk	28
Figur 16 Rørgatas beliggenhet	29
Figur 17 Test i fullskala gjennomført av Covestro AG og Penstock BV (Svalesen, 2015)	30
Figur 18 Situasjonen i grøftebunnen a) Før tiltak b) Etter tiltak	31
Figur 19 Enkel forskalingsløsning a) Prinsippfigur b) Utførelse i felt	32
Figur 20 a) Forskalingen løftes b) Forskalingen er plassert rundt røret	33
Figur 21 Fremgangsmåte for fylling av åpen forskaling	33
Figur 22 a) Lukket form b) Forma åpnes c) Forma festes rundt røret	34
Figur 23 a) Pour-skum tilføres via åpningene i forma b) Forma løftes av	35
Figur 24 Påføring av sprøyteskum direkte på rør	35
Figur 25 Telt for oppvarming av røroverflaten	36
Figur 26 Skum påført med ulik temperatur på komponentene a) Temp. 25 °C b) Temp. 45°C	39
Figur 27 Hulrom i PU-skummet rundt rørperiferien	40
Figur 28 God heft mellom PU-skum og røroverflaten	40
Figur 29 Overflate med "hinne" som beskytter vannet mot å trenge inn	41
Figur 30 Resultater fra vannabsorpsjonstest med ulike densiteter (Thirumal, et al., 2008)	45
Figur 31 Prinsippskisse av prøvestykker	45
Figur 32 Oppsett av forsøk	46
Figur 33 Daglig utvikling av vannabsorpsjon	48
Figur 34 Sammenheng mellom densitet og vannabsorpsjon	48
Figur 35 Synlige variasjoner i cellestruktur	51
Figur 36 Gjennomgang av prøvestykker	52
Figur 37 Prinsippfigur for oppdeling av prøvestykker	52
Figur 38 Prinsippfigur av prøvestykker	53
Figur 39 a) Måling av prøvenes vekt b) Prøver lagt i vannbad	54
Figur 40 Prøvestykkene plassert på fryserom, vendt mot fryserommets vifter	54
Figur 41 Trend i daglig vannabsorpsjon	55
Figur 42 Deformasjon av prøvestykket (avbøyning)	57
Figur 43 Deformasjon av prøvestykket (ujevnheter)	57
Figur 44 Hendelsesforløp når materialet utsettes for påkjenninger (forklarende figur)	62
Figur 45 Resultater fra forsøk utført av Covestro (referert i Svalesen 2015)	62

Figur 46 Resultater fra trykkfasthetforsøk utført av Svalesen (2015).....	63
Figur 47 Utforming av prøvestykker benyttet i forsøkene til Svalesen (2015).....	63
Figur 48 Resultater fra strekkfasthetforsøk utført av Svalesen (2015).....	64
Figur 49 Markerte prøvestykker som fraktes i isoporkasse for å unngå opptining før testing.....	64
Figur 50 Trykkfasthet testes i en Instron prøvemaskin a) Startposisjon b) Ca. 10% deformasjon	65
Figur 51 Prøvestykker for testing av strekkfasthet formskjæres etter følgende mål og utforming	66
Figur 52 Utskjæring av prøvestykker	66
Figur 53 Strekkfasthet testes i en Instron materialprøvemaskin a) Startposisjon b) Brudd i materialet	67
Figur 54 Trykkfasthet prøve 3A og 3B	70
Figur 55 Trykkfasthet prøve 7A og 7B	70
Figur 56 Trykkfasthet prøve 17A og 17B	70
Figur 57 Trykkfasthet prøve 18A og 18B	71
Figur 58 Trykkfasthet prøve 29A og 29B	71
Figur 59 Trykkfasthet prøve 30A og 30B	71
Figur 61 Visuell sammenligning av prøve 3 og 7	72
Figur 60 Visuell sammenligning av prøve 17 og 18	72
Figur 62 Visuell sammenligning av prøve 29 og 30	72
Figur 63 Strekkfasthet prøve 2A, 2B og 2C	77
Figur 64 Strekkfasthet prøve 16A, 16B og 16C	77
Figur 65 Strekkfasthet prøve 30A, 30B og 30C	77
Figur 66 Retning for testing av trykkfasthet.....	78
Figur 67 Spenning-tøyningsdiagrammet for prøve 3A og 3B	79
Figur 68 Tiltent område for tøying.....	80
Figur 69 Retning for testing av trykkfasthet.....	81
Figur 70 Utforming av prøvestykker for mål av densitet	84
Figur 71 Gjennomføring av slagtest.....	87
Figur 72 Variasjoner i slagtest.....	88
Figur 73 Prinsipiell figur av heftforsøk.....	89
Figur 74 Gjennomførte metoder a) Åpen forskaling b) Lukket forskaling c) Direkte påføring.....	91

Tabelliste

Tabell 1 Informasjon om sprøyteskum og pour-skum (Covestro AG, 2016).....	14
Tabell 2 Symbolforklaring for utregning av PU-skumets varmeoverføring	18
Tabell 3 Beskrivelse av prøvestykkene og prøvenes densitet	47
Tabell 4 Vannabsorpsjon etter 4 døgn i vannbad	47
Tabell 5 Vannabsorpsjon etter 8 døgn i vannbad	47
Tabell 6 Oversikt over hvilke prøver som skal gjennomgå de ulike testene	53
Tabell 7 Total vannabsorpsjon og effekt av tørking.....	56
Tabell 8 Informasjon om de ubehandla prøvestykkene.....	68
Tabell 9 Trykkfasthet for de ubehandla prøvestykkene	68
Tabell 10 Informasjon om prøvestykker testet i frossen tilstand.....	69
Tabell 11 Trykkfasthet for prøvestykker testet i frossen tilstand	69
Tabell 12 Verdier for strekkfasthet for de ubehandla prøvestykkene	73
Tabell 13 Verdier for strekkfasthet for prøvestykkene testet i frosset tilstand.....	74
Tabell 14 Verdier for strekkfasthet for prøvestykkene som gjennomgikk fryse-/tinesykluser	75
Tabell 15 Sammenligning av strekk- og trykkfasthet for alle prøvestykkene	76
Tabell 16 Oversikt over densitet og gjennomsnittsverdier for strekk- og trykkfasthet: sprøyteskum...	85
Tabell 17 Oversikt over densitet og gjennomsnittsverdier for strekk- og trykkfasthet: pour-skum.....	86
Tabell 18 Utstyr benyttet i slagtest.....	87
Tabell 19 Resultater fra slagtest	88

1. Innledning

Masteroppgaven bygger videre på arbeidet som ble utført i forbindelse med fordypningsprosjektet "Legging av rørgater med PU-skum" av (Johnsen, 2016). Fordypningsprosjektet var basert på erfaringer fra pilotprosjektet ved Lille Måsevann pumpestasjon (heretter omtalt som Lille Måsevann) utført sommeren/høsten 2016. Ved Lille Måsevann ble polyuretanskum benyttet som omfyllingsmasse rundt en nedgravd rørgate for første gang.

1.1 Bakgrunn

I kjølvannet av *Elsertifikatordningen* som trådte i kraft ved inngangen til 2012, var det forventet kraftig økning for utbygging av småkraftverk (< 10 MW) fram mot 2021 (Lia, et al., 2015). I utløpet av 4. kvartal 2016 var det henholdsvis 455 prosjekter innen småkraft som fikk endelig tillatelse til utbygging. I tillegg har Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) fortsatt 320 småkraftprosjekter i saksbehandlingsprosess (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2017).

I 2016 ble det totalt satt i drift 33 småkraftanlegg med en årlig produksjon på 332 GWh. Til sammenligning ble det satt i drift 34 småkraftanlegg i 2015 med en årlig produksjon på 311 GWh (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2017). Økningen i produksjon skyldes fortrinnsvis ulik størrelse på prosjektene som ble gjennomført.

Utbyggingen de siste årene har vært betydelig lavere enn det som ble forutsett. Det skyldes i hovedsak elsertifikatprisene og påvirkningen av lave kraftpriser. Resultatet er at potensielt lønnsomme prosjekter ikke er økonomisk hensiktsmessig å bygge ut. For å motarbeide trenden i markedet er det hensiktsmessig å utarbeide alternative løsninger for å gjøre besparelser i byggeprosessen, og dermed kutte byggekostnadene.

Vannveien for småkraftverk utgjør henholdsvis 40-60% av den totale byggekostnaden (Lia, 2016). For de fleste småkraftverk er det mest aktuelt å benytte rørgate til fordel for tunnel – det gjenspeiles i gjeldende konsesjonssøknader hos NVE. For å gjøre utbygging mer attraktivt og lønnsom for prosjekteierne bør mulighetene for å redusere kostnadene knyttet til rørgata undersøkes.

I dag benyttes stort sett pukk og knuste masser som omfyllingsmasser rundt nedgravde rørgater. Det foreligger store kostnader til den tradisjonelle metoden, avhengig av blant annet produksjon og transport av masser. Dessuten er omfylling og komprimering et tidkrevende arbeid. For å gjøre besparelser på området er det nødvendig å undersøke andre løsninger, noe det nederlandske selskapet Penstock BV (Penstock) startet arbeidet med i 2014.

Metoden som ble utviklet benytter polyuretanskum (PU-skum) som omfyllingsmasse, og fungerer som en erstatting for pukk og knuste masser. Målet med metoden er å senke kostnadene knyttet til utbygging og å redusere byggetiden.

Det er tidligere blitt utført tester på laboratorium både hos leverandør av PU-skum Covestro AG (Covestro, tidligere Bayer Material Science), og av Svalesen (2015) på Materialteknisk laboratorium ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Testene Svalesen

(2015) gjennomførte, viste at PU-skummet hadde tilfredsstillende skjærkapasitet til å motstå de bevegelser som det utsettes for. Testene gjennomført av Covestro (referert i Svalesen, 2015) viste gode mekaniske egenskaper.

Statkraft Energi AS (Statkraft) eier og driver Adamselv Kraftverk i Lebesby kommune, Finnmark. I 2013 ble det innvilget konsesjon for å regulere Lille Måsevann med 0,5 m, og pumpe tilsiget opp til Store Måsevann – inntaksmagasinet til Adamselv Kraftverk. Prosjektet var ikke lønnsomt, fordi den økte produksjonen ikke veide opp for byggekostnadene. Da Statkraft ønsket å være delaktig i å videreutvikle metoden med PU-skum, åpnet det for muligheten til å søke om finansiell støtte for forskningsbasert arbeid. Med støtte fra ENOVA, for å utvikle innovativ teknologi, ble prosjektet lønnsomt og igangsatt.

Prosjektet gikk i hovedsak ut på å bygge en pumpestasjon ved Lille Måsevann med tilhørende rørgate opp til Store Måsevann. Tilnærmet 300 m av den totalt 1100 m lange rørgata ble lagt med PU-skum som omfyllingsmasse. Arbeidet ble ferdigstilt i november 2016.

1.2 Hensikt

Problemstillingene i oppgaven baseres på videreutvikling av PU-skum som omfyllingsmasse. Tidligere arbeid og prosjektet ved Lille Måsevann, legger grunnlaget for videreutviklingen. Erfaringene som ble gjort ved Lille Måsevann legger et godt grunnlag for å evaluere, videreutvikle og verifisere metoden og det arbeidet som ble gjort.

Oppgaven omhandler drøfting av tidligere utført feltarbeid. Basert på erfaringene og vurderingene som ble gjort ved Lille Måsevann, er det grunn til å tro at et eventuelt senere prosjekt vil kunne gjennomføres på en mer hensiktsmessig måte ved å ekskludere tidligere utfordringer.

Én av utfordringene ved Lille Måsevann var å produsere et skum med tilstrekkelig kvalitet ute i felt. Oppgaven har derfor ha et stort fokus på kvalitet – både i byggeperioden, men også hvordan kvaliteten påvirkes over tid.

En av hovedhensiktene med å utarbeide og publisere oppgaven er at metoden skal gjøres kjent for andre, og videre bli et konkurransedyktig alternativ ved bygging av rørgater. Som en del av oppgaven produseres en artikkel. Artikkelen er et bidrag til den internasjonale konferansen Hydro 2017, Hydropower & Dams, i Sevilla (Spania). Hensikten med artikkelen er "å skape blest" rundt metoden i sin helhet, og samtidig gjøre metoden kjent på det internasjonale markedet. Artikkelen er gjengitt i sin helhet i vedlegg 7.

1.3 Metode for utførelse og oppgavens begrensninger

Den publiserte litteraturen om emnet er begrenset og det teoretiske grunnlaget baseres i hovedsak på datablader fra skumleverandør Covestro og tidligere skrevet oppgaver. Erfaringer fra bruk av metoden i praksis er knyttet til prosjektet som ble gjennomført ved Lille Måsevann.

Ved gjennomføringen av prosjektet ble det skåret ut prøvestykker med PU-skum fra rørgata. Prøvestykkene legger grunnlaget for gjennomføring av forsøk og drøfting av kvalitet. Prøvene testes for trykk- og strekkfasthet på Materialteknisk laboratorium ved NTNU.

Som tidligere nevnt, utarbeides en artikkel i forbindelse med konferansen Hydro 2017. Artikkelen er resultatet av samarbeidet mellom Nina Johnsen (NTNU), Stian Løbø Aaker (NTNU), Mattias Kullberg (Multiconsult ASA), Tor Oxhøvd Svalesen (Statkraft Energi AS), Guy Harris (Penstock BV) og Leif Lia (NTNU). Forklaring på arbeidsfordelinga i artikkelen er gitt i vedlegg 8.

Masteroppgaven begrenses til 30 studiepoeng – en arbeidsbelastning tilsvarende ett semester. Arbeidet med masteroppgaven er utført i perioden 16. januar 2017 – 11. juni 2017.

1.4 Gjeldende lovverk

Relevant for oppgaven er de lover og bestemmelser som omhandler nedgravde rørgater. Gjeldende forskrifter er basert på bruk av tradisjonelle omfyllingsmasser. For PU-skum som omfyllingsmasser er det enda ikke utviklet et eget regelverk. Dagens gjeldende regelverk er likevel gjengitt i oppgaven, fordi det er relevant for utvikling av den nye omfyllingsmetoden.

Videre bør det, av aktuelle myndigheter, utarbeides egne bestemmelser som rettes spesielt mot PU-skum som omfyllingsmasse og metoden generelt. Drøfting av fremtidige lovbestemmelser er ikke inkludert i oppgaven.

1.4.1 Damsikkerhetsforskriften og tilhørende retningslinjer

Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften) §5-15 omhandler rør og tverrslagsporter (Lovdata, 2010). Det er NVE som setter bestemmelsene for hvordan utforming og dimensjonering av rør og rørtrase skal gjennomføres. NVE (2011) har i "Retningslinjer for stenge og tappeorganer, rør og tverrslagsporter" gitt utdypninger om bestemmelsene i Damsikkerhetsforskriften.

For oppgaven er §5-15 annet ledd i Damsikkerhetsforskriften av vesentlig betydning:

- *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.* (Lovdata, 2010)

For utforming av rørgrøft og omfylling av rør står det i "Retningslinjer for stenge og tappeorganer, rør og tverrslagsporter" følgende:

- *Nedgravde rør monteres vanligvis i rørgrøft over grunnvannsspeil.*
- *Fundamentet i rørgrøfta skal være stabilt og avrettet, og det skal ikke forekomme oppstikkende fjellknatter eller steiner.*
- *De graderte omfyllingsmassene inn mot rørveggen skal minst ha en tykkelse på 0,3 m, og innfylles slik at utvendig røroverflate eller korrosjonsbeskyttelse ikke skades.*
- *I fjellgrøft skal tykkelsen på grøftesålen være 0,3 m, mens sålen i løsmassegrøft minst må være 0,2 m.*

- *Grøftesåle og omfyllingsmasse skal komprimeres for at rør og rørfundamenter blir liggende stabilt uten fare for setninger eller uforutsigbare tilleggspåkjenninger.*
- *Geoteknisk tekstil (filterduk) legges i den grad det blir nødvendig for å beskytte omfyllingen for finstoffinntrengning.*
- *Overdekningen skal minst være 0,8 m og gå 1,5 ganger rørdiameter til hver side for røraksen. Dertil kommer eventuell frostisolasjon med toppdekking.*

Det påpekes at nevnte regler og retningslinjer ikke er utarbeidet med utgangspunkt i bruk av PU-skum. Dagens gjeldende lovverk er likevel i stor grad gjeldende for den nyutvikla metoden.

I vedlegg 6 er det utarbeidet en *veileder* for bruk av metoden. Veilederen tar utgangspunkt i utførelse av metoden i praksis, spesielle hensyn som må ivaretas og nødvendige tiltak for å produsere PU-skum med tilstrekkelig kvalitet i felt. Veilederen er utarbeidet i samarbeid med medstudent Stian Løbø Aaker. Arbeidsfordelingen er forklart i vedlegg 8.

1.5 Tidligere gjennomført arbeid

Metoden er nyutviklet teknologi, og det finnes ikke mange tidligere utgitte oppgaver som omhandler temaet. Oppgaven baseres på arbeidet som hittil er gjort i følgende sammenhenger:

1.5.1 Masteroppgave

- "Omfillingsmasser for rørgater i bratt terreng" av Svalesen (2015).
Oppgaven omhandler dagens praksis ved bygging av nedgravde rørgater, og bruk av omfillingsmasser. I forbindelse med oppgaven ble det blant annet gjennomført torsjonsforsøk og målinger av trykk- og strekkfastheten i PU-skum.

Oppgaven er tilgjengelig i fulltekst i NTNUs åpne arkiv for innleverte masteroppgaver.

1.5.2 Prosjektoppgaver

- "Deformasjoner i skumlagte rørgater" av Aaker (2016)
Oppgaven baseres på arbeidet som ble utført i prosjektet ved Lille Måsevann sommeren/høsten 2016. Det ble skåret ut prøvestykker fra PU-skummet som ble benyttet i prosjektet, og prøvene er blitt testet for fuktopptak i forbindelse med prosjektoppgaven. Arbeidet som ble gjennomført ga blant annet et større innblikk i frostegenskaper og vannopptak.
- "Legging av rørgater med PU-skum" av Johnsen (2016)
Oppgaven baseres på arbeidet som ble utført i prosjektet ved Lille Måsevann sommeren/høsten 2016. Vurdering av arbeidet som ble gjennomført, metoder for påføring av PU-skum og utforming av grøftetverrsnitt er problemstillingene i oppgaven. Det ble dessuten lagt stort fokus på forutsetninger for å oppnå skum av god kvalitet.

1.5.3 Prosjekt i fullskala

- "Lille Måsevann pumpestasjon" i Adamselv, Finnmark.
Statkraft er eier og initiativtaker til prosjektet som ble gjennomført ved Lille Måsevann sommeren/høsten 2016. Prosjektet inkluderer en rørgate på 1100 m, der 300 m av den totale lengden ble lagt med PU-skum som omfillingsmasse.

Hovedfokuset var å avdekke uforutsette utfordringer, samt finne en gunstig påføringsmetode for PU-skummet. I tillegg var det et stort fokus på å utvikle løsninger som resulterte i skum av god kvalitet.

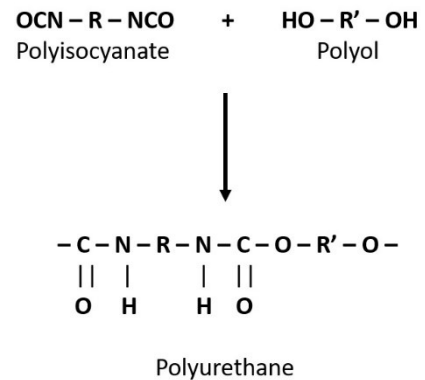
2. Polyuretanskum

2.1 Grunnleggende teori

Teorien bak framstillingen av PU-skum er vesentlig for å forstå materialets egenskaper. Teorien er også viktig for å forstå hvordan egenskapene kan påvirkes i både positiv og negativ retning ved produksjonen av materialet.

2.1.1 Materiale

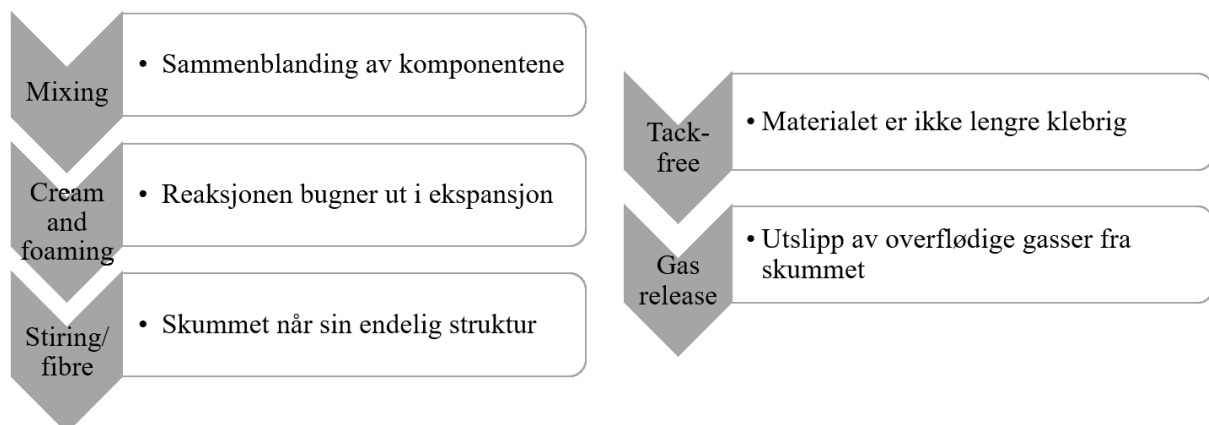
PU-skum er et to-komponents materiale bestående av hovedsakelig basismaterialene isocyanat og polyol. Isocyanat er et kjemikal, og polyol et alkohol (M3, u.d.) (Covestro AG, 2016). Hver for seg er komponentene væsker med ulik farge, men i kontakt med hverandre vil komponentene gjennomgå en kjemisk reaksjon og danne det faste stoffet polyuretan. I tillegg til komponentene tilsettes det et blåsemiddel i blandingen. Det finnes ulike blåsemidler på markedet, men felles for blåsemidlene er at de fremstiller en hurtig ekspansjon av materialet. Ekspansjonen frigir gass som fordeler seg i cellene og danner skum. Den kjemiske reaksjonen mellom komponentene er kompleks, men en oversikt er gjengitt på figur 1.



Figur 1 Kjemisk reaksjon mellom isocyanat og polyol (Kapps & Buschkamp, 2004)

Isocyanat og polyol er stoffer som reagerer med hverandre i en eksoterm prosess. Med *eksoterm prosess* menes en kjemisk reaksjon som avgir høy varme (Store Norske Leksikon, 2016). I kombinasjon med blåsemiddelet vil høy varme føre til utviklingen av gass og en fordampning, avhengig av hvilket blåsemiddel som blir benyttet. Fordampingen innad i cellene fører til at skummet ekspanderer (PU Nordic, u.d.). På grunn av PU-skummets store andel med lukka celler i materialet (>90%), vil det ta tid før blåsemiddelet fordampes. For å unngå forurensning i atmosfæren benyttes gjerne vann som blåsemiddel i dag.

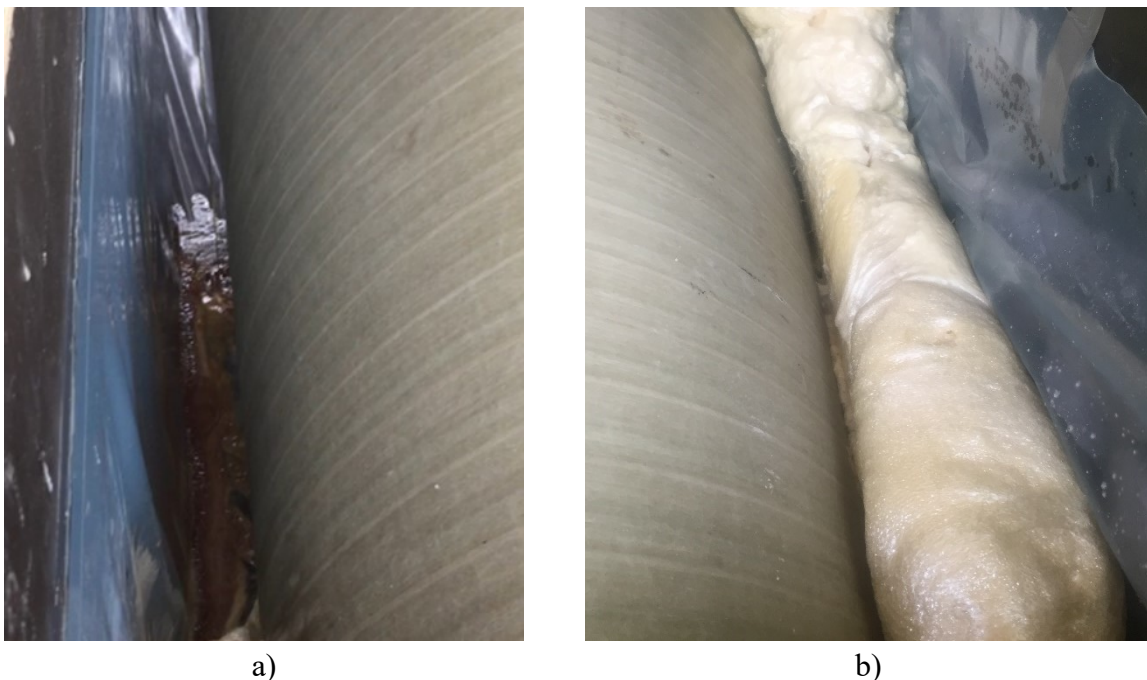
Fra komponentene reagerer med hverandre, gjennomgår produksjonen ulike faser. Hendelsesforløpet er gjengitt på figur 2, og baseres på informasjon hentet fra "The production of rigid polyurethane foam" av Kapps & Buschkamp (2004).



Figur 2 Ulike faser i framstillingen av PU-skum

Første steg vil være å la komponentene komme i kontakt med hverandre. Blandingen kan enten foregå mekanisk, eller for hånd. Dersom det skal produseres et lite volum med skum vil det være mest hensiktsmessig å blande komponentene for hånd. Ved produksjon av et stort volum skum, kan det være lønnsomt å investere i en mekanisk blandingspumpe. Mekanisk blandingspumpe er metoden som videre omtales i oppgaven.

Når den kjemiske reaksjonen har startet, vil væsken begynne å ekspandere. Tiden det tar før ekspansjonen synliggjøres, avhenger av blandingsforhold og temperatur på komponentene. I løpet av ekspansjonen vil det i tillegg forekomme en fargeforandring i materialet. Blandingen vil gå fra å ha en mørk farge i flytende form, til en mer kremaktig farge ved dannelsen av skum. Forandringen er vist på figur 3, der a) viser skummets konsistens og farge før komponentene har reagert. Figur 3 b) viser ekspandert skum med kremaktig farge.



Figur 3 a) Flytende skum med mørk farge b) Ekspandert skum med kremaktig farge

I etterkant av ekspansjonen vil skummet fastne til og nå sin endelige struktur. Skummet vil ikke utvides ytterligere, men materialet har enda ikke oppnådd sin endelige konsistens. Den harde konsistensen oppnås først etter endt herding. Skummet vil etter en viss tid, avhengig av blandingsforhold, få en overflate som ikke er klebrig.

2.1.2 Ulike blandingsforhold og temperaturpåvirkning

Egenskapene til skummet kan forandres ved å endre f. eks. blandingsforholdet og temperaturen på komponentene. Endringen er synlig for reaksjonstiden og oppnådd kvalitet etter endt herding. Om blandingen inneholder en lik blandingsfordeling mellom polyol og isocyanat, vil det føre til en raskere reaksjon enn hva det vil gjøre om andelen isocyanat overgår andel med polyol.

Det skilles mellom to ulike typer PU-skum. I oppgaven er typene omtalt som sprøyteskum og 'pour-skum'. Til opplysning kan typene gå under andre betegnelser på markedet, som f.eks.

sprayskum og helle-/fylleskum. Som betegnelsen tilsier produseres sprøyteskum ved å sprøyte skummet direkte på overflaten – i dette tilfellet røroverflaten. Når PU-skum benyttes som isolasjonsmateriale i vegger, er det sprøyteskum som påføres. Pour-skum er mer hensiktsmessig å benytte i tilfeller der det er en forskaling, eller en form, som skal fylles. Med *pour-skum* menes at skummet fylles, eller helles, i forskalingen.

Forskjellen mellom de ulike skumtypene gjenspeiles hovedsakelig i reaksjonstiden. Pour-skum har en saktere reaksjonstid, og skummet vil derfor bruke lengre tid før det begynner å ekspandere. I tabell 1 er blandingsforhold, egnet temperatur og skumtypenes reaksjonstid gjengitt. Verdiene er hentet fra datablader utviklet av Covestro (2016). Databladene er gjengitt i sin helhet i vedlegg 1 og 2.

Tabell 1 Informasjon om sprøyteskum og pour-skum (Covestro AG, 2016)

Betegnelse	Blandingsforhold POL:ISO	Egnet temperatur* °C	Reaksjonstid** sekunder
Sprøyteskum	1:1	45-60	12 ± 4
Pour-skum	1:1,25	25-35	330 ± 30

* Temperatur på komponentene

** Tid fra blanding av komponentene til skummet ikke lenger er klebrig

Komponentene er følsomme for temperatur, og små forskjeller vil kunne føre til store endringer i materialet. Ved lave temperaturer vil komponentene få en tykkere konsistens, noe som gjør det vanskeligere å blande komponentene optimalt. Lav temperatur vil kunne resultere i en ufullstendig reaksjon mellom komponentene. Den ufullstendige reaksjonen synliggjøres i kvaliteten på det herda skummet i form av at skummet får en "svampeaktig" konsistens, mørkere farge og områder der materialet er veldig sprøtt. Dersom temperaturen på komponentene overstiger den anbefalte verdien er det fare for at varmeutviklingen i skummet blir for høy, og at det oppstår hulrom i materialet. Hulrom i materialet er ikke et ønskelig resultat fordi det vil opptre som svake soner i skummet.

2.1.3 Blanding ved hjelp av mekanisk blandingspumpe

Å blande komponentene mekanisk krever en kompleks maskin. Når det skal produseres et stort volum med skum vil det være både tidkrevende og lite økonomisk gunstig å blande komponentene for hånd. I et slikt tilfelle vil det være lønnsomt å investere i en mekanisk blandingspumpe som har kapasitet til å blande, og tilføre, et stort volum skum på kort tid.



a)



b)

Figur 4 a) Eksempel på en mekanisk blandingspumpe b) Skjermen viser temperaturen

Mekanikken bak maskinen er omfattende, og dekkes ikke i oppgaven. Prinsippet er likevel enkelt, og går kort fortalt ut på at komponentene tilføres fra hver sin beholder til et munnstykke. I munnstykket blir komponentene blandet sammen under høyt trykk før de påføres på det aktuelle området. Et eksempel på en mekanisk blandingspumpe er vist på figur 4 a). Temperaturen på både komponentene og slangen som komponentene føres gjennom, kan justeres på maskinen. For kontinuerlig oversikt til enhver tid kan temperaturen leses av på den digitale skjermen tilknyttet maskinen. En digital skjerm som viser temperaturoversikt er vist på figur 4 b). Mekanisk blanding åpner for temperaturendringer med enkle grep, og at blandingsforhold lett kan endres dersom det er ønskelig.

2.2 Styrkeegenskaper

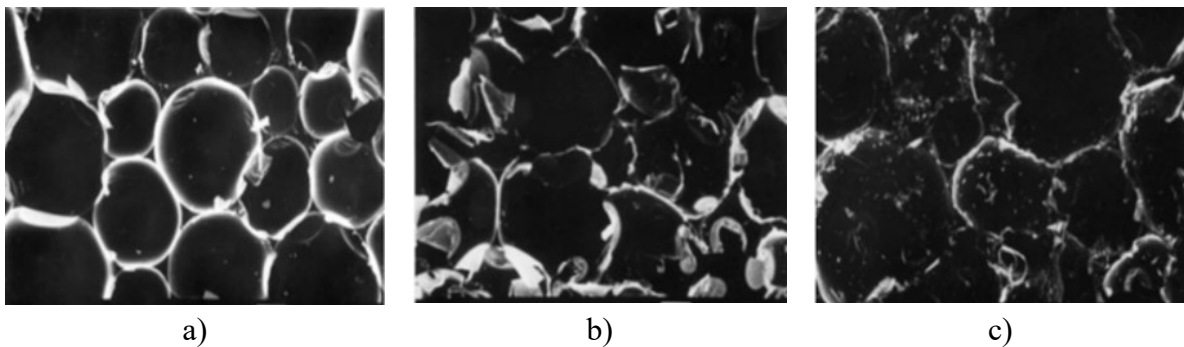
2.2.1 Densitet

Densiteten til PU-skummet avhenger av flere faktorer, og er en viktig parameter når det gjelder egenskapene til skummet. Densiteten påvirkes av mengde blåsemiddel i reaksjonen, temperatur på komponentene og tilgjengelig område for ekspansjon under produksjonen.

Polyol er et hygroskopisk materiale (Kapps & Buschkamp, 2004). Med *hygroskopisk* menes at materialet har evne til å absorbere fuktighet fra vanndampholdig gass – for eksempel luft (Store norske leksikon, 2016). Under lagring må polyol beskyttes godt for fuktighet, slik at vann ikke

blandes inn ukontrollert. Som nevnt er vann et mye benyttet blåsemiddel som øker volumet av cellene, og en økning av vanninnholdet vil da føre til større andel porer og en lavere densitet.

Thirumal et al. (2008) publiserte en artikkel som omhandler innvirkningen blåsemiddelet har på densiteten til PU-skum. På grunn av at blåsemiddelet sørger for ekspansjonen i skummet, vil densiteten bli lavere når andelen blåsemiddel økes. Lavere densitet i samsvar med økt andel blåsemiddel skyldes utviklingen av gass i cellene. Figur 5 viser påvirkningen på cellene etter hvert som andelen blåsemiddel økes. Ved lavt innhold blåsemiddel vil cellene ha en klar, strukturert form med tykke cellevegger, som vist på figur 5 a). Når andelen øker vil cellenes struktur bli mer diffus, og celleveggene tynnere.



Figur 5 a) Densitet: 103 kg/m^3 b) Densitet: 60 kg/m^3 c) Densitet: 42 kg/m^3 (Thirumal, et al., 2008)

Figur 5 synliggjør hvordan densiteten blir påvirket av andelen blåsemiddel. Ved lavt innhold blåsemiddel er cellene jevnt fordelt. Fordelingen avtar etter hvert som andelen blåsemiddel øker. Ved høyt innhold blåsemiddel vil cellene til slutt gå til brudd. (Thirumal, et al., 2008)

En annen faktor som påvirker densiteten er temperaturen på komponentene – mot høye temperaturer ($>60 \text{ }^\circ\text{C}$), vil temperaturen i reaksjonen være så høy at cellene kollapser (Kapps & Buschkamp, 2004). Som et resultat vil densiteten øke. Den høye varmeutviklingen vil også kunne resultere i hulrom i skummet – noe som er negativt for kvaliteten. Varmeutviklingen må i tillegg tas hensyn til ved lavere temperaturer, siden reaksjonen alene produserer varme. I det tilfelle at det påføres et stort volum i én og samme syklus, vil varmeutviklingen kunne nå en temperatur mellom 120 og $180 \text{ }^\circ\text{C}$ (Kapps & Buschkamp, 2004).

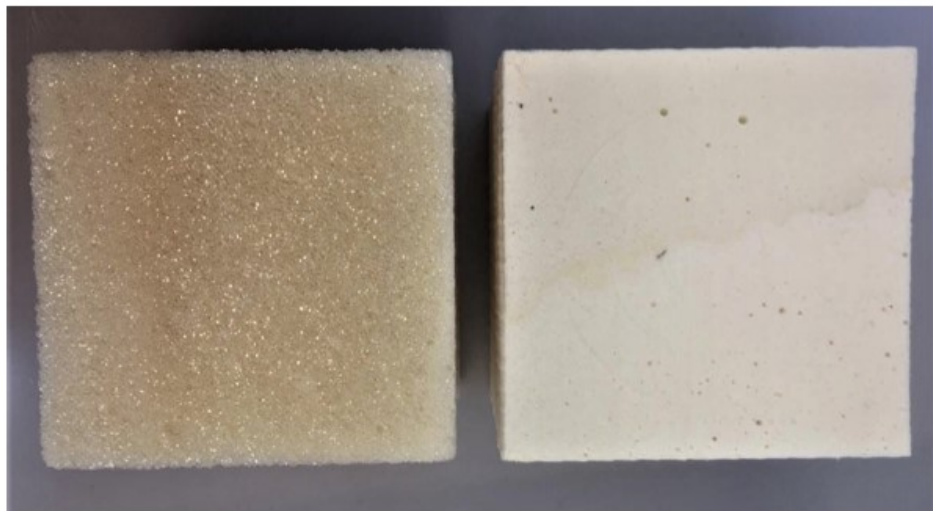
PU-skum kan ekspandere med en volumutvidelse på 30 ganger det opprinnelige volumet (Buzzi, et al., 2007). Så lenge det finnes en fri flate for skummet å ekspandere mot, og så lenge det er tilgjengelig blåsemiddel i reaksjonen, vil skummet ekspandere. Når skummet ikke får ekspandere fritt vil det bygges opp et trykk, og materialet vil fremstå som mer kompakt.

2.2.2 Cellestruktur

Cellene i PU-skummet kan være både lukket og åpne – avhengig av egenskapene som er ønskelig å oppnå. I tilfeller der cellene er åpne vil skummet ha en myk konsistens, og materialet er egnet til bruk i f.eks. madrasser og skosåler. PU-skum med lukka celler resulterer i et fast materiale som er mer egnet til injeksjoner i bakken og beskyttelse rundt komponenter. Materialet er ikke like fleksibelt som PU-skum med åpne celler.

Det er vanskelig å karakterisere cellestrukturen til PU-skum, siden alle skummaterialer vil ha variasjoner i cellenes størrelser og ulikheter i fordelingen mellom andelen lukka og åpne celler (Sivertsen, 2007). Det er likevel vanlig praksis å karakterisere PU-skummet ut i fra den dominerende andelen med åpne eller lukka celler. Det er PU-skum med lukka celler som omtales i oppgaven.

Cellenes form og størrelse påvirkes av faktorer som andel blåsemiddel, metode for påføring, og temperaturen på komponentene ved reaksjonen. Ved påføring av PU-skummet vil heveretningen til skummet påvirke cellenes struktur i form av at de blir avlange i heveretningen (Sivertsen, 2007). Figur 6 viser PU-skum med ulikheter i cellestrukturen.



Figur 6 PU-skum produsert med ulike temperaturer

Skummet på figur 6 er produsert med ulik temperatur på komponentene, og med ulik metode for påføring. Figur 6 (til venstre) viser skum med store celler. Den aktuelle materialprøven er hentet fra et område der varmeutviklingen har vært stor, noe som kan resultere i store celler og hulrom. Figur 6 (til høyre) viser et homogent, fint skum med små celler det er vanskelig å få øye på. Skummet med små celler er resultatet av lav varmeutvikling, og bruk av anbefalt temperatur på komponentene ved påføring.

2.2.3 Mekaniske egenskaper

De mekaniske egenskapene til skummet er direkte knyttet til cellestrukturen (Sivertsen, 2007). I PU-skum med åpne celler vil materialet kunne trykkes sammen. Luften i cellen presses da ut, men suges tilbake igjen når trykket gir slipp. Lukka celler vil ikke ha den samme egenskapen, i form av at celleveggene må knuses for å oppnå samme effekt. Når cellene har gått til brudd, vil de ikke kunne fylles med luft på samme måte som åpne celler.

PU-skum består av et fast materiale, med innblanding av mange gassfylte celler. I materialet har gass lavest mekanisk styrke, og jo mer gass som er innblandet i materialet – jo svakere vil den mekaniske styrken til skummet være (Sivertsen, 2007). I denne sammenhengen kan det også sies at jo mer gass om er innblandet i materialet – jo lavere vil densiteten være. Densitet og mekanisk styrke er derfor to parametere med stor tilknytning til hverandre.

2.3 Varmeoverføringsegenskaper

2.3.1 Innledning til varmeoverføring

Hittil er det forstått at PU-skum består både av et fast materiale og luftlommer (celler). Materialets ledningsevne bestemmes ut fra kombinasjonen av nevnte faktorer. I tillegg avhenger varmeoverføring av materialets geometri og tykkelse, samt temperaturforskjellen i materialet og omgivelsene rundt (Sørensen, u.d.).

PU-skum har en lav varmeledningsevne ($0,025 \text{ W/m}^*\text{K}$) og egnes derfor godt som isolasjonsmateriale. For gjennomføring av forsøkene i oppgaven kreves gjentatte fryse-/tineprosesser av materialet. For å fastslå hvor lang tid som er nødvendig før de aktuelle prøvestykkene blir gjennomfrosset, kreves beregninger.

Beregningene bør i realiteten baseres på 3D-geometrien til prøvestykkene, men for forenkling er det gjort beregninger i 1D på den største flaten der den dominerende varmeoverføringen går i én retning.

Formlene benyttet i utregningen er hentet fra boken "Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th Edition" skrevet av Bergman, et al. (2006). Verdiene benyttet i formlene er hentet fra samme bok. Følgende symboler er benyttet i utregningene:

Tabell 2 Symbolforklaring for utregning av PU-skumets varmeoverføring

Symbol	Forklaring	Verdi	Benevning
C_1	Friksjonskoeffisient	Finnes fra B_i	Dimensjonsløs
δ_{luft} (ved -20°C)	Densitet	1,39	Kg/m^3
μ_{luft} (ved -20°C)	Dynamisk viskositet	$160 * 10^{-7}$	N*s/m^2
k_{luft} (ved -20°C)	Varmeledningsevne	$22,3 * 10^{-3}$	$\text{W/m}^*\text{K}$
v_∞	Hastighet (antatt)	0,5	m/s
δ_{PU}	Densitet	90	Kg/m^3
$C_{p,\text{PU}}$	Varmekapasitet	1382	$\text{J/kg}^*\text{K}$
k_{PU}	Varmeledningsevne	0,025	$\text{W/m}^*\text{K}$

Prøvestykkene flyttes fra romtemperatur tilnærmet lik 20°C , til et fryserom som holder -18°C . For å utføre beregningene velges en ønsket temperatur i midten av prøvestykkene. Temperaturen velges til -10°C . I beregningene benyttes en høyde, $L^* = 200\text{ mm}$, og en bredde, $L = 30\text{ mm}$ på prøvestykkene. Tid er forkortet med bokstaven t .

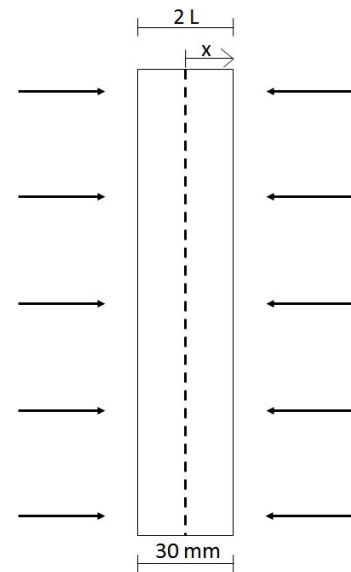
Ved:

$$t < 0: T(x, t) = 20^{\circ}\text{C}$$

$$t \geq 0: T_{\infty} = -18^{\circ}\text{C}$$

Krav:

$$T(0) = -10^{\circ}\text{C ved } t = ?$$



Figur 7 Prinsippfigur for varmeoverføring

2.3.2 Beregninger

Ut i fra gitte krav kan tidspunkt, t , løses ut fra likningen:

$$\theta^* = \frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = C_1 * \exp(-\xi_1^2 * F_o) \quad (1)$$

Der C_1 og ξ_1 er koeffisienter hentet fra "Table 5.1" på figur 10.

Varmeovergangstall, h :

Antar hastighet på luft i kjølerom $v_{\infty} = 0,5\text{ m/s}$

Reynolds tall:

$$Re = \frac{\delta_{luft} * v_{\infty} * L^*}{\mu_{luft}} \quad (2)$$

Der μ_{luft} og δ_{luft} er hentet fra "Table A.4" på figur 8.

TABLE A.4 Thermophysical Properties
of Gases at Atmospheric Pressure^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707

Figur 8 Verdier for μ_{luft} og δ_{luft} (Bergman, et al., 2006)

Prandtl's tall:

Antar homogenitet i materialet, og at varmeoverføringen er uavhengig av trykket. Prandtl's tall er da:

$$Pr = 0,706$$

Nusselt's tall:

$$Nu = \frac{h * L^*}{k_{luft}} = 0,664 * \sqrt{Re} * Pr^{1/3} \quad (3)$$

$$h = Nu * \frac{k}{L^*} \quad (4)$$

Fouriers tall:

$$Fo = \frac{\alpha * t}{L^2} = \frac{k_{PU}}{\delta_{PU} * C_{p,PU}} * \frac{1}{L^2} * t \quad (5)$$

Verdiene for δ_{PU} og $C_{p,PU}$ er hentet fra artikkelen "Polyurethane foam as aggregate for thermal insulating mortars and lightweight concrete", publisert av Václavík, et al. (u.d.).

THERMO-TECHNICAL PROPERTIES		
Thermal conductivity		
λ		
W/(m·K)		0,025
Linear expansion coefficient (for density of 30 to 100 kg/m³)		
1/K		$(5 \div 8) \times 10^{-5}$
Specific heat capacity	kJ/(kg·K)	1,382

Figur 9 Verdier for δ_{PU} og $C_{(p,PU)}$ (Václavík, et al., u.d.)

Biots tall:

$$Bi = \frac{h * L}{k_{PU}} \quad (6)$$

Reynolds tall regnes ut fra formel 2:

$$Re = \frac{1,39 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,20 \text{ m}}{160 * 10^{-7} \text{ N} * \text{s}/\text{m}^2} = 8687,5$$

Bruker Reynolds tall til utregning av formel 3, og finner Nusselts tall:

$$Nu = 0,664 * \sqrt{8687,5} * 0,706^{\frac{1}{3}} = 55,1$$

Formel 4 gir varmeovergangstallet, h:

$$h = 55,1 * \frac{22,3 * 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}}{0,20 \text{ m}} = 6,1 \approx 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}}$$

Finner Biots tall fra formel 6, og videre C_1 og ξ_1 fra "Table 5.1" vist på figur 10:

$$Bi = \frac{5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} * 0,015 \text{ m}}{0,025 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}} = 3$$

TABLE 5.1 Coefficients used in the one-term approximation to the series solutions for transient one-dimensional conduction

Bi^*	Plane Wall		Infinite Cylinder		Sphere	
	ζ_1 (rad)	C_1	ζ_1 (rad)	C_1	ζ_1 (rad)	C_1
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902	1.5044	1.2488
1.0	0.8603	1.1191	1.2558	1.2071	1.5708	1.2732
2.0	1.0769	1.1785	1.5994	1.3384	2.0288	1.4793
3.0	1.1925	1.2102	1.7887	1.4191	2.2889	1.6227
4.0	1.2646	1.2287	1.9081	1.4698	2.4556	1.7202

Figur 10 Verdier for C_1 og ζ_1 (Bergman, et al., 2006)

Fouriers tall regnes ut fra formel 5:

$$F_o = \frac{0,025 \frac{W}{m \cdot K}}{90 \left(\frac{kg}{m^3}\right) * 1283 \left(\frac{J}{Kg \cdot K}\right)} * \left(\frac{1}{(0,015m)^2}\right) * t = 9,62 * 10^{-4} * t$$

Ved hjelp fra gitte krav, og likning 1, kan nå nødvendig tid, t, regnes ut:

$$T(x, t) = T_\infty + (T_i - T_\infty) * C_1 * \exp(-\zeta_1^2 * F_o)$$

$$-10^\circ C = -18^\circ C + (20^\circ C + 18^\circ C) * 1,2102 * \exp(-1,1925^2 * 9,62 * 10^{-4} * t)$$

$$8^\circ C = 45,99 * \exp(-1,37 * 10^{-3} * t)$$

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{8}{45,99}\right)}{1,37 * 10^{-3}} = 1278 \text{ s} = 21,3 \text{ min}$$

Beregningene viser at prøvestykker med høyde lik 200 mm og bredde lik 30 mm, krever 21,3 minutter i fryserom før kjernen i materialet når $-10^\circ C$. Forutsetningen er at fryserommet holder en temperatur på $-18^\circ C$ i det aktuelle tidsrommet.

Beregningene tar utgangspunkt i PU-skum med densitet 90 Kg/m^3 , og antagelsen at luften på fryserommet beveges med en hastighet på $0,5 \text{ m/s}$.

2.4 Kvalitet

2.4.1 Behandling av komponentene

Begge komponentene må behandles med forsiktighet både ved lagring og produksjon. Komponentene er begge ømfintlige materialer, noe det må tas hensyn til. Dersom polyolet eller isocyanatet utsettes for uheldig påvirkning under lagring, vil det gjenspeiles i kvaliteten etter endt herdetid.

Som nevnt er polyol et hygroskopisk materiale med evne til å absorbere fuktighet fra vanddampholdig gass, som f.eks. luft. For å unngå uønska endringer i egenskapene er det derfor viktig at materialet beskyttes godt mot fuktighet under lagring. Eksempel på gode lagringsforhold er ved tette beholdere, som vist på figur 11.



Figur 11 Lagringsforhold ved tette beholdere

Isocyanat bør også beskyttes mot eksponering av luft og luftfuktighet. I kombinasjon med luftfuktighet vil isocyanat gjennomgå en kjemisk reaksjon og danne stoffet *polyurea* (Kapps & Buschkamp, 2004). Polyurea er et fast stoff, og dannelsen av materialet i en lagringsbeholder kan føre til store maskinelle ødeleggelser på utstyret. Avleiringer i beholderen kan medføre tilstopping og blokkering av ledninger og dyser.

I tillegg til eksponering mot luft, er det viktig å ta høyde for lagringstiden. Ved lagring over lengre tid vil komponentene gjennomgå en kjemisk endring, og egenskapene forandrer seg. Forandringene vil være synlig i både økt viskositet, reduksjon i evnen til å reagere og i selve stabiliteten til komponentene (Kapps & Buschkamp, 2004).

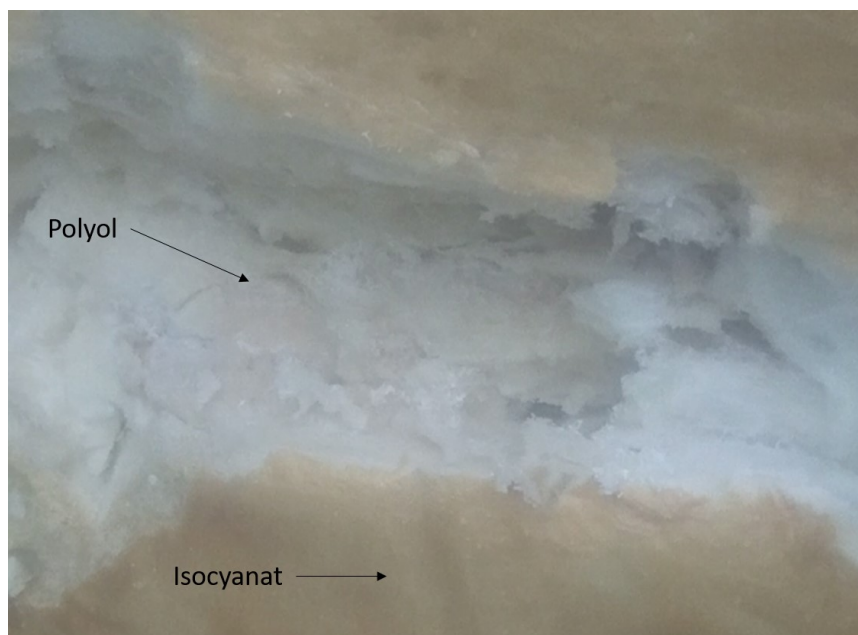
Store temperaturvariasjoner er ønskelig å unngå under lagring. Høye temperaturer over lengre tid vil føre til et ustabil skum. Det er derfor viktig å unngå at komponentene blir ekspandert for

direkte sollys hvis de blir lagret utendørs. Lave temperaturer vil føre til en høy viskositet, og lav bearbeidbarhet. Optimal lagringstemperatur for å opprettholde egenskapene til komponentene er temperaturer rundt 20 °C (Kapps & Buschkamp, 2004). For å holde temperaturen jevn er det hensiktsmessig å lagre komponentene i beholdere, isolerte containere eller i tilpassa rom som kan holde stabil temperaturen over tid.

2.4.2 Kjennetegn på god kvalitet

Det er mange faktorer som påvirker kvaliteten. Som belyst i avsnittet over er riktig lagringsforhold av komponentene en viktig faktor. For å kunne gjenkjenne PU-skum av god kvalitet etter produksjon, må indikasjoner på god kvalitet og tegn som peker mot skum av dårlig kvalitet være kjent.

God kvalitet kjennetegnes av en homogen masse, der den gjennomgående fargen på skummet er den samme (Kapps & Buschkamp, 2004). Om skummet inneholder fargeendringer kan det være en indikasjon på at komponentene ikke har gjennomgått en fullstendig reaksjon, og at fargeforskjellene som vises er polyol eller isocyanat som ikke har reagert med hverandre. Figur 12 viser en situasjon der en ufullstendig reaksjon har forekommet. Komponentene har ikke reagert med hverandre, og polyol og isocyanat kan visuelt skilles fra hverandre.



Figur 12 Ufullstendig reaksjon mellom polyol og isocyanat

Videre skal materialet være uten hulrom og store celler. Hulrom i massen indikerer at varmeutviklingen under reaksjonen har vært for høy, eller at det er påført et for tykt lag med skum slik at varmen ikke rekker å trekke ut i løpet av ekspansjonen. Store celler vil være synlig i tilfeller der andelen med blåsemiddel er for stor, eller som et resultat av for høy temperatur under reaksjonen.

Dersom det er nødvendig at PU-skummet hefter til materialet det er påført på, er heft også en egenskap som indikerer god kvalitet. Ved bruk av PU-skum som omfyllingsmasser på rette rørstreknings, der det er lite krefter som skal fordeles i materialet, vil ikke heft være en kritisk

faktor. Med *fordeling av krefter* menes skummets egenskaper til å ta opp de kreftene som oppstår i rørgata. Ved bend i rørgata er det behov for større kraftopptak, og heft mellom skum og rør er kritisk. I slike tilfeller må det bekreftes at heft er oppnådd. Oppnådd heft kan testes ved "transverse tensile strength" (Kapps & Buschkamp, 2004). Gjennomføringen av testen er både tid- og ressurskrevende, og dårlig egnet i feltarbeid.



a)



b)

Figur 13 Undersøkelser av oppnådd heft a) Ingen/liten heft b) Indikasjon på god heft

For en mer gjennomførbar metode i felt, kan et prøvestykke løsnes fra røroverflaten manuelt. Så fremt det kreves mye styrke for å få løst prøvestykket, og om det ligger igjen skumrester på røroverflaten, er det et tegn på heft mellom materialene. Figur 13 b) viser et tilfelle der skummet har heftet godt mot røroverflaten. Hvis materialet slipper enkelt fra røroverflaten indikerer det liten, eller ingen, heft. En situasjon der liten heft er oppnådd er vist på figur 13 a). Metoden for gjennomføring resulterer ikke i et konkret tall på heft mellom skum og rør, men gir en god indikasjon.

2.4.3 Tiltak for å oppnå god kvalitet

For å oppnå god kvalitet legges det til rette for gode lagringsforhold og varsom behandling av komponentene. Ved utføring av selve arbeidet er det viktig å gjennomføre kontinuerlig overvåkning av blandingsforhold og temperatur på komponentene underveis i prosessen. Blandingsforhold overvåkes ved å kontrollere maskin (mekanisk blanding), og kontinuerlig føre tilsyn med ligningen for blandingen mens arbeidet foregår. Ved mekanisk blanding, og sprøyting med sprøytepipistol, er det dessuten vesentlig at komponentene blir tilført samtidig i munnstykket for en jevn sammenblanding (Kapps & Buschkamp, 2004). Blandingsforhold, temperatur og jevn tilførsel til munnstykket overvåkes ved hyppige kontroller av maskin og utstyr.

En kan være tjent med å lage et prøvestykke med skum før påføring på selve røret. Blandingen kan kontrolleres og inspiseres visuelt, og eventuelle feil eller mangler elimineres. Dersom prøvestykket skjæres i to synliggjøres dessuten cellestrukturen, og eventuelle hulrom i materialet kan avdekkes.

2.5 Begrensninger

2.5.1 Vann og fukt

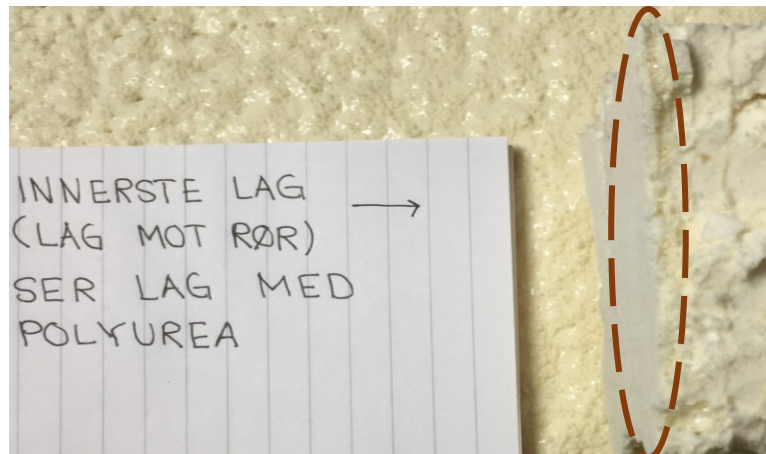
I fremstillingen av PU-skum dannes stoffet polyurea. Stoffet dannes som et biprodukt når vann tilsettes som blåsemiddel, og om andelen vann øker vil det resultere i en større andel polyurea. Det er ønskelig at andelen polyurea er så liten som mulig fordi materialet har en sprø konsistens og dårligere mekaniske egenskaper sammenlignet med polyuretan (Kapps & Buschkamp, 2004).

Er røroverflaten våt, vil det i sjiktet røroverflate og skum utvikles et lag med polyurea. For å unngå ytterligere utvikling av polyurea, er det viktig at røroverflaten er fri for vann og fukt ved påføring av skummet. Effekten fra vannet vil forplantes videre innover i skumtverrsnittet i form av en grovere cellestruktur og lavere densitet (Kapps & Buschkamp, 2004).

2.5.2 Heft og temperatur

Forutsatt at PU-skummet skal håndtere kreftene som oppstår i bend i rørgata, er det kritisk at skummet og røret arbeider som ett materiale. For å oppnå et slikt scenario må skummet hefte mot røroverflaten. Så fremt heften ikke er tilstrekkelig er det mulig for røret å gli ut av muffa, og at det oppstår brudd i rørgata. Rørgata kan sees på som et halskjede – om kjedet ryker er hele funksjonaliteten borte. Gitt at omfyllingen i områder med bend skal kunne karakteriseres som av god kvalitet, er det vesentlig at heft opptrer i sjiktet mellom PU-skummet og røroverflaten.

Som allerede påpekt vil det kunne dannes polyurea i tilfeller der røroverflaten er våt. Polyurea kan også dannes ved for lav temperatur på røroverflaten. Den kritiske overflatetemperaturen for å unngå dannelse av polyurea er 15 °C (Kapps & Buschkamp, 2004).



Grunnen til at det legges stort fokus på dannelse av polyurea i

Figur 14 Synlig lag med polyurea markert med sirkel

kombinasjon med heft, er at stoffet ikke hefter mot røroverflaten. For å oppnå et godt resultat er det derfor ønskelig at røroverflaten holder en temperatur over den kritiske verdien på 15 °C. Prøvestykket som er vist på figur 14 er påført på en røroverflate med lavere temperatur enn den kritiske verdien, og resultatet er et synlig lag med polyurea nærmest røroverflaten.

I rettstreknings vil ikke heft være et like viktig kriterium, og forutsetningene for hva som er "god kvalitet" endres. I slike tilfeller er skummetts viktigste egenskap å beskytte røroverflaten mot skader og punktbelastninger, og heft er ikke avgjørende for god kvalitet på arbeidet.

2.5.3 Åpne celler

Som nevnt tidligere består skummet av >90 % lukka celler. Cellestrukturen er en viktig faktor for skummets gode egenskaper. Dersom cellene sprekker, eller punkteres, svekkes egenskapene som de lukka cellene er bakgrunn for. Det er derfor viktig å opprettholde den lukka strukturen i skummet, og unngå dannelse av åpne celler.

Åpne celler i skumoverflaten vil absorbere vann i tilfeller der skummet blir eksponert for det. Selv om skummet er et godt isolasjonsmateriale, vil det fryse hvis det blir utsatt for lav temperatur over lengre tid. Frost vil kunne føre til at vannet i de åpne cellene ekspanderer, og det er tenkelig at det vil gi en "dominoeffekt" til nærliggende celler slik at de sprekker. Påvirkningen av gjentatte fryse-/tinesykluser omhandles senere i oppgaven.

2.5.4 Rørtype

Det må være hensiktsmessig å benytte PU-skum som omfyllingsmasse. I forbindelse med nedgravde rørgater til småkraftverk brukes i dag gjerne glassfiberarmert polyester (GRP-rør), polyetylenrør (PE-rør) eller duktile støpejernsrør. Rørtypene har ulike egenskaper, og det må vurderes hvilken type som er egnet til bruk i hvert enkelt prosjekt.

PU-skum har hovedsakelig to oppgaver – beskytte røret for skader og fordele de opptredende kreftene i bend innad i materialet. For rør av glassfiberarmert polyester stilles strenge krav til omfyllingsmassene (Future Pipe Industries, u.d.). Rørtypen er sårbar for deformasjoner og skader, noe det må tas hensyn til ved omfylling. Duktile støpejernsrør er mer robuste rør, og stiller ikke de samme krav til omfylling. Basert på krav til omfyllingsmassene, vil det mest sannsynlig ikke være hensiktsmessig å benytte PU-skum rundt duktile støpejernsrør, da stedlige masser kan tilbakefylles.

For å kunne fordele de opptredende bendkreftene er det vesentlig at PU-skummet og røret arbeider som ett materiale. Det vil si at skummet må hefte mot røroverflaten. Polyetylenrør er plastrør, og har en glatt overflate. For at heft mellom skum og PE-rør skal oppstå, er det nødvendig å overflatebehandle røroverflaten i forkant av påføring av skum. Et slikt tiltak representerer en ekstra kostnad. Duktile støpejernsrør har igjen en mer grovere overflate, og PU-skummet ville mest sannsynlig heftet godt mot røroverflaten. På grunn av det ikke-eksisterende behovet for finere omfyllingsmasser, er likevel ikke duktile støpejernsrør det mest gunstige alternativet.

Rør av glassfiberarmert polyester har en grovere overflate sammenlignet med polyetylenrør, og skummet vil hefte mot røroverflaten. I kombinasjon med behovet for finere omfyllingsmasser, er tilsynelatende glassfiberarmert polyester den mest gunstige rørtypen å kombinere med PU-skum som omfyllingsmasse.

3. Gjennomføring av pilotprosjekt

3.1 Introduksjon til pilotprosjektet

I 2013 fikk Statkraft tillatelse til regulering av Lille Måsevann og utbygging av Lille Måsevann pumpestasjon ved Adamselv kraftverk i Lebesby kommune, Finnmark. Prosjektet omfattet også tre bekkeinntak.

Overføringene innebærer en økt produksjon ved eksisterende kraftanlegg i Adamselv. Adamselv kraftverk ble satt i drift i 1973, og har en midlere årsproduksjon på 199 GWh (Statkraft AS, u.d.). Utbyggingen gir en samla økning i produksjon på 6-7 GWh regulerbar kraft (Norges vassdrag- og energidirektorat, 2012).

I tilknytning til utbyggingen av Lille

Måsevann pumpestasjon ble det vedtatt at deler av pumpeledningen til Store Måsevann, inntaksmagasinet for Adamselv kraftverk, skulle legges med PU-skum som omfyllingsmasse. Prosjektet ble utført som et forskningsbasert arbeid, med fokus på å videreutvikle metoden med bruk av PU-skum. Det er selve utbyggingen av rørgata med PU-skum som omfyllingsmasse som omtales som *pilotprosjekt* i oppgaven.

3.1.1 Initiativtakere

Metoden der PU-skum benyttes som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater, ble først presentert av det nederlandske selskapet Penstock. Penstock inngikk et samarbeid med det tidligere småkraftselskapet Odelskraft AS for å videreutvikle metoden. Odelskraft AS ønsket å benytte PU-skum som omfyllingsmasse i utbyggingen av kraftverk, og kontaktet NVE for klarsignal. NVE ønsket ytterligere forskning å verifisere metoden, og pekte på NTNU som sted for videre utvikling.

Svalesen (2015) hadde påbegynt masteroppgaven "Omfyllingsmasser for rørgater i bratt terreng", da metoden ble introdusert for NTNU. Svalesen inkluderte videre forskning på PU-skum i oppgaven, og gjorde blant annet enkle verifiseringsforsøk på mekaniske egenskaper og friksjonsforsøk på grenseflaten mellom PU-skum og grøftevegg. Forsøkene ble gjennomført i samarbeid med skumprodusenten Covestro, og Materialteknisk laboratorium ved NTNU.

Statkraft gjennomgikk tidligere gitte konsesjoner, og gjorde beregninger som tydet på at ikke-lønnsomme prosjekter hadde bedre potensiale dersom tradisjonelle omfyllingsmasser ble erstattet med PU-skum. Prosjektet ved Lille Måsevann hadde gyldig konsesjon, rørgate i klasse 0 og lav trykkehøyde. Utgangspunktet for å gjennomføre forskningsbasert arbeid på anlegget var



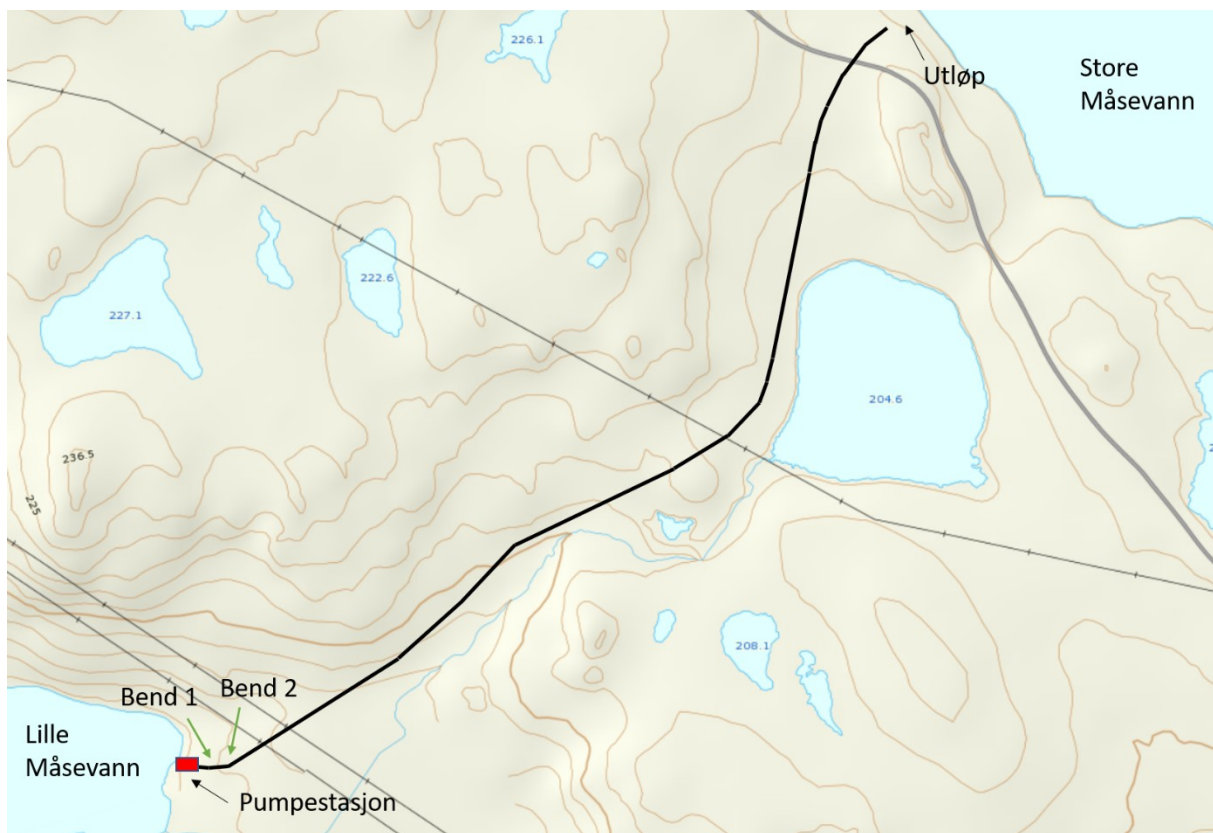
Figur 15 Lokasjon Adamselv Kraftverk

godt. I kombinasjon med finansiell støtte fra ENOVA, som støtter forskningsbasert arbeid, ble prosjektet ved Lille Måsevann lønnsomt og vedtatt gjennomført.

Prosjektet ble igangsatt sommeren 2016. To masterstudenter fra NTNU, Aaker og Johnsen, fulgte utviklingen gjennom byggeperioden for å innhente data og informasjon til videre forskningsarbeid.

3.1.2 Prosjektets omfang

I tilknytning til pumpestasjonen ble det bygget en 1100 m lang rørgate med inntak ved Lille Måsevann og utløp ved Store Måsevann. Rørene som ble benyttet er henholdsvis GRP-rør med DN 800 og DN 900. I tillegg er det to bend med avvikling på 15° i traseen. Rørgatas fulle utstrekning i terrenget er vist på figur 16.



Figur 16 Rørgatas beliggenhet

Hovedforutsetningen for å realisere prosjektet var det økonomiske tilskuddet fra ENOVA. Det var derfor viktig at PU-skum ble benyttet på en representativ del av rørgata. Grunnet forsinkelser ble totalt ca. 300 m av rørgata skumlagt. På resterende lengde ble det benyttet tradisjonelle omfyllingsmasser.

3.1.3 Nødvendigheten av gjennomføring i fullskala

Det finnes flere rapporter og ulike kilder som omhandler egenskapene til PU-skum. På grunn av at metoden er innovativ, og ikke tidligere gjennomført, finnes det ingen kilder som omhandler PU-skum rundt *nedgravde* rør i litteraturen. Kunnskap rundt gjennomføring av metoden i praksis var følgelig lav i forkant av pilotprosjektet.

Før gjennomføringen av pilotprosjektet var kunnskapen knyttet til PU-skum rundt nedgravde rør, kun fra laboratorieforsøk. Covestro (referert i Svalesen 2015) hadde tidligere gjennomført forsøk på mekanisk styrke – tester Svalesen (2015) også utførte med enkle verifiseringsforsøk. Utover dette gjennomførte Covestro, i samarbeid med Penstock, et mindre forsøk der det ble påført skum direkte på et rør i en åpen grøft. Resultatene fra forsøket var lovende, se figur 17.



Figur 17 Test i fullskala gjennomført av Covestro AG og Penstock BV (Svalesen, 2015)

Tester utført i laboratorium fører ikke med seg de samme utfordringene som et prosjekt i fullskala. Arbeidet i laboratorium hadde et stort fokus på skummets egenskaper, og ikke utfordringer knyttet til den praktiske delen av selve arbeidet i felt. I felt kan utfordringer som ikke tidligere er blitt forutsett, oppstå. Det var nødvendig for metoden å gjennomføre et prosjekt i fullskala for å belyse utfordringene, og på best mulig måte finne løsninger på problemene.

3.2 Gjennomføring

3.2.1 Bakgrunn

Dersom grunnforholdene hadde tillatt det, ville det mest hensiktsmessige være å fylle PU-skum direkte i grøfta slik at røret hadde blitt "limt fast" til massene rundt. Det lot seg ikke gjennomføre, grunnet at massene i grøftetraseen inneholdt mye vann. Resultatet var en gjørmete grøftebunn med utfordrende arbeidsforhold. Situasjonen er visende på figur 18 a). Som nevnt tidligere, har fritt vann en negativ innvirkning på kvaliteten til skummet. Løsningen ble å legge røret på en bæresone med tunnelmasser og 8-22 mm pukkk, i kombinasjon med filterduk og drenasjerør. Skummet og rørgata ble da liggende på stabile masser og upåvirket av vann fra grunnen. Resultatet etter at tiltakene ble gjennomført er vist på figur 18 b).



Figur 18 Situasjonen i grøftebunnen a) Før tiltak b) Etter tiltak

For blanding av komponentene og påføring av skummet, ble det ved Lille Måsevann benyttet en mekanisk blandemaskin av typen Graco H40-reactor. Maskinen er en hydraulisk blande- og pumpemaskin med mulighet til å justere temperaturen på komponentene opp til 88 °C (GRACO, u.d.). Maskinen er vist på figur 4 a).

I løpet av prosjektet ble det benyttet både pour-skum og sprøyteskum som omfylling. Begge skumtypene var levert av samme leverandør – Covestro. Covestro benytter vann som blåsemiddel, og skummet er derfor ikke til skade for miljøet (PU Nordic, u.d.). Datablader med informasjon om de ulike skumtypene er vedlagt som vedlegg 1 og 2.

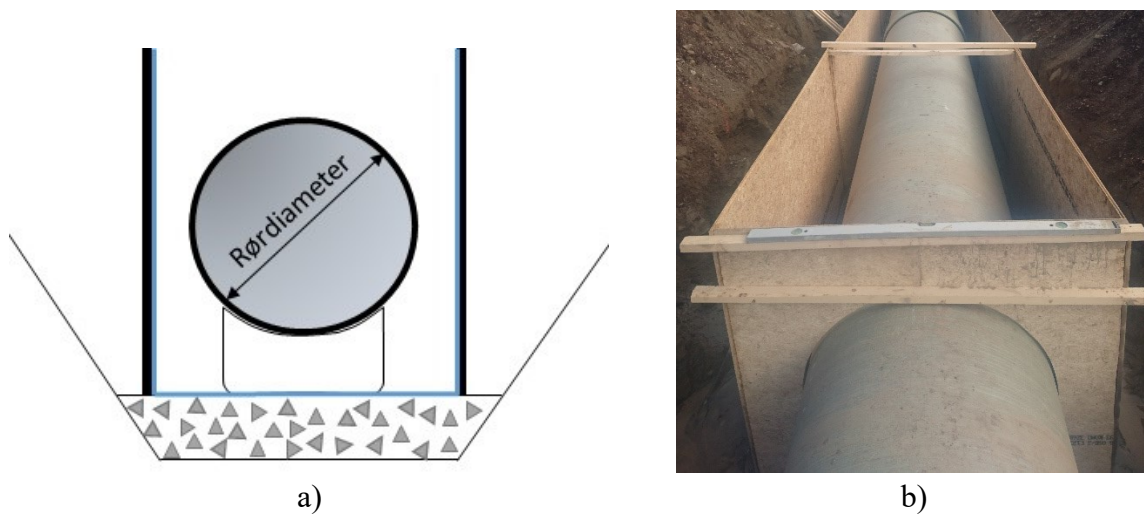
Med hensyn til forskningen i prosjektet, ble det gjennomført ulike metoder for påføring av skummet. Grunnen til at ulike metoder ble testet, var at flere utfordringer med

installasjonsmetode ble avdekket underveis i prosjektet. At utfordringene skulle bli store hadde ikke aktørene forespeilet på forhånd, og gjennomføring i fullskala var nødvendig for å avdekke de praktiske problemene.

Metodene for påføring er tidligere gjengitt i "Legging av rørgater med PU-skum" av Johnsen (2016). Fremgangsmåten for hvordan de ulike metodene ble utført gjengis også her, ettersom det er relevant for de erfaringene som ble gjort i ved Lille Måsevann.

3.2.2 Påføring i åpen forskaling

Innledningsvis ble det testet en enkel forskalingsløsning. Metoden besto av plater på sidene av røret, og avgrensninger rundt rørperiferien. Forskalingen var åpen i toppen slik at skummet kunne ekspandere fritt i vertikal retning. Prinsippet er vist på figur 19 a). Måten metoden ble gjennomført på i felt, er gjengitt på figur b).



Figur 19 Enkel forskalingsløsning a) Prinsippfigur b) Utførelse i felt

Dersom komponentene kommer i kontakt med vann i reaksjonsfasen er det uheldig for kvaliteten. Erfaringene viste fort at metoden var væravhengig med tanke på regn, yr og fukt. Løsningen ble forkastet til fordel for en mer kompleks forskalingsmetode.

Den videreutvikla forskalingsmetoden inneholdt en takløsning som skjermet for nedbør. Metoden ble også effektivisert i forhold til den tidligere metoden ved å montere en løfteanordning i taket, som vist på figur 20. Løfteanordningen ga mulighet for enklere forflytning av forskalingen langs rørgata.

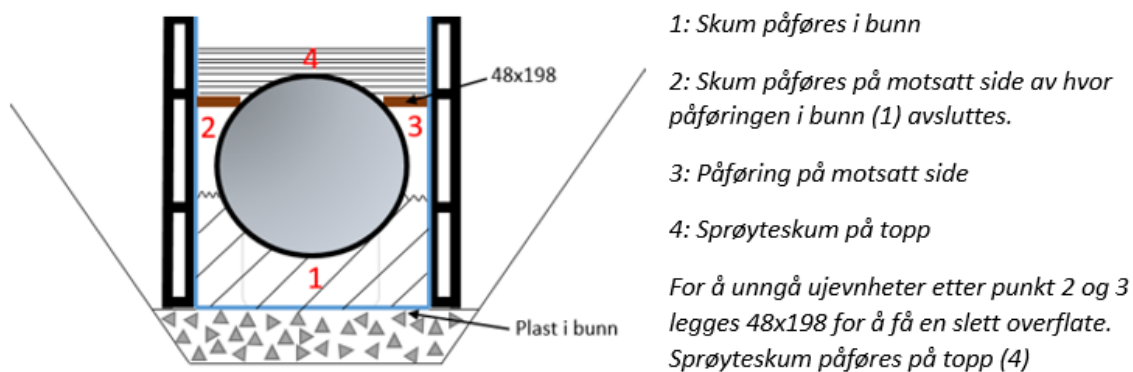


Figur 20 a) Forskalingen løftes b) Forskalingen er plassert rundt røret

PU-skum hefter godt mot tre og for å forhindre at skummet heftet mot forskalingsplatene, ble det lagt plast mellom skummet og forskalingen. Plastduken sørget for at forskalingen løsnet fra skummet når skummet fastnet til.

Når forskalingsmetoden ble benyttet som påføringsmetode, ble det brukt pour-skum som omfylling. Reaksjonstiden for pour-skum er lengre enn sprøyteskum, og senere reaksjonstid medfører at skummet rekker å trekke under røret før det begynner å ekspandere. Ved raskere reaksjonstid vil skummet ekspandere i en høyere hastighet, og det er stor sannsynlighet for dannelse av hulrom og svekkelse av stabiliteten under selve røret.

Forskalingen ble fylt seksjonsvis med skum, som vist på figur 21. For forenkling ble seksjon 4 skummet på et senere tidspunkt med bruk av sprøyteskum.



Figur 21 Fremgangsmåte for fylling av åpen forskaling

Grunnen til at forskalingen ble fylt seksjonsvis var for å sørge for at hele rørperiferien ble fylt med skum. Skummet ekspanderer mot enkleste frie flate, og for "å tvinge" skummet mot røroverflaten var det nødvendig med flere seksjoner. Det er dessuten vanskelig å beregne nødvendig mengde flytende skum til å fylle forskalingen, og ved å dele opp påføringen seksjonsvis fikk operatør et visuelt syn på hvor mye resterende skum som måtte tilføres.

Påføring med åpen forskaling var den første metoden som ble benyttet. I løpet av gjennomføringen ble det testet ulike temperaturer på komponentene. I ettertid viste det seg at i noen tilfeller var temperaturen for lav, i andre tilfeller for høy. Variasjonene som ble gjort med tanke på temperatur, var synlig i kvaliteten på skummet når forskalingen ble fjernet. Ved lave temperaturer klarte ikke polyolet og isocyanatet å blande seg tilstrekkelig, mens det ved høye temperaturer oppsto hulrom i materialet som følge av varmeutviklingen.

Metoden var ressurskrevende i den forstand at maskineri var nødvendig for å forflytte forskalingen. Erfaringene fra prosjektet var at slik type arbeidskraft var tidvis vanskelig å lokalisere, og som et resultat oppsto mye ventetid.

3.2.3 Påføring i lukket forskaling

Parallelt med utviklingen av metoden med bruk av PU-skum, utviklet Penstock en egen påføringsmetode for skum. Påføringsmetoden var ikke ferdig utviklet ved prosjektstart, og resultatet bærer preg av nødvendige kompromisser som ble gjennomført for å ferdigstille forma.

Metoden besto av en lukket forskaling som ble manøvrert med en mekanisk "klo". Kloen åpnet og lukket forma sånn at den kunne plasseres rundt røret, og sørge for en tett omkransning. Prinsippet er vist på figur 22.



a)

b)

c)

Figur 22 a) Lukket form b) Forma åpnes c) Forma festes rundt røret

For å forhindre heft mellom forma og røret ble det påført et lag med "Chemtrend mould release agent". Produktet er et kjemisk middel som forhindrer heft mellom materialer (Chemtrend, u.d.). Ved påføringen av skummet var det åpninger i forma for sprøytepistolen. Åpningene gjorde det mulig for sprøytepistolen å føres inn til røroverflaten, se figur 23 a). Det ble benyttet pour-skum ved gjennomføring av metoden.



a)



b)

Figur 23 a) Pour-skum tilføres via åpningene i forma b) Forma løftes av

Etter endt påføring måtte skummet fastne til før forma kunne løsnes, og videre løftes av. Figur 23 b) viser hvordan forma løftes av røret, og det oppnådde skumtværsnittet gjøres synlig.

Metoden med lukket forskaling var også avhengig av maskineri – både for forflytning, men også for håndtering av selve forma. Det var dessuten meget strenge krav til utforming av grøftebunn, siden forma er tilpasset en bestemt høyde fra grøftebunnen og opp til røret. Små ujevnheter førte til at skum i væskeform trengte under forma før ekspansjonen startet.

3.2.4 Påføring direkte på rør

Det ble undersøkt om skummet kunne påføres direkte på røret – uten noen form for forskaling. For påføring av skum direkte på røret er det vesentlig at skummet rekker å reagere hurtig på røroverflaten. Ved sen reaksjonstid vil skummet "renne av" før ekspansjonen starter. Sprøyteskum har en reaksjonstid som er tilnærmet 27 ganger raskere sammenlignet med pour-skum, og skumtypen egnes godt til direkte påføring.



Figur 24 Påføring av sprøyteskum direkte på rør

Ved påføring ble skummet sprøytet direkte på røret, og ekspansjonen startet i det komponentene traff røroverflaten. For å unngå høy varmeutvikling i tverrsnittet ble skummet påført i lag med 30 mm tykkelse. Hvert lag ble avkjølt i 10-30 minutter.

Tiden som krevdes for avkjøling var ikke å regne som "dødtid". Sprøyteutstyret var utstyrt med en 100 meter lang slange og operatør kunne dermed arbeide på et lengre strekke av rørgata i påvente av at tidligere lag kjølte ned. Etter avkjøling ble neste lag påført, og slik ble syklusen gjentatt til ønsket tykkelse var nådd.

Metoden med påføring direkte på røret var eneste metoden som ikke var avhengig av større maskineri ved utførelsen. For utførelse var det kun nødvendig med to personer – én ansvarlig for selve påføringen av skummet, og én assistent til arbeidet. Grunnet at metoden krevde få ressurser, ga påføring direkte på røret den største framdriften pr. time (Johnsen, 2016).



Figur 25 Telt for oppvarming av røroverflaten

Ved de to bendene nederst i rørgata ble det bygd et telt over røret. Teltet ble bygd for muligheten til å kontrollere fukt og for å kunne varme opp røroverflaten med varmluft. På dette tidspunktet var temperaturkriteriene for å oppnå god heft mellom PU-skum og rør kjent, og det ble gjennomført tiltak for å innfri kravet. Ved hjelp av varmluft ble teltet varmet opp, og temperaturen på røroverflaten ble målt i området 20-25 °C da skummet ble påført.

3.2.5 Oppdrift

Hver av de ulike metodene som ble brukt etterlater ulike skumtværssnitt rundt rørperiferien. Volum skum benyttet rundt røret vil ha innflytelse på oppdriften. Med *oppdrift* menes summen av trykkreftene som virker mot overflaten av et legeme når det er helt eller delvis nedsenket i en væske (Store norske leksikon, 2016)

I "Legging av rørgate med PU-skum" av Johnsen (2016) ble følgende tiltak foreslått for å motvirke oppdrift:

- 1) Benytte så lavt volum av skum som mulig
- 2) Sørge for tilstrekkelig overdekning

Ved gjennomføring av pilotprosjektet var hovedfokuset å videreutvikle metoden og utarbeide en gunstig metode for påføring av skum. Det ble ikke lagt stort fokus på å minimalisere oppdriften. Rørtraseen var prosjektert på en slik måte at røret hadde tilstrekkelig overdekning i utgangspunktet, og oppdrift var derfor ikke en stor utfordring.

Ved bruk av PU-skum som omfyllingsmasse i senere prosjekter, spesielt ved liten overdekning, må oppdrift tas hensyn til. Det er da nødvendig å foreta beregninger som viser nødvendig overdekning for å forhindre oppdrift av rør.

3.3 Erfaringer

3.3.1 Påføringsmetoder

Det knyttes ulike erfaringer til de forskjellige påføringsmetodene. Metodene ble utviklet etter hvert som ny kunnskap ble tilegnet, og det er vanskelig å sammenligne metodene hver for seg. Sees det bort fra kvaliteten som ble oppnådd, er det likevel mulig å sammenligne den praktiske utførelsen knyttet til metodene.

Påføring i åpen forskaling

Den åpne forskalingen var i prinsippet en "enkel" metode. Når forskalingen var bygget til å passe den aktuelle rørdiameteren, var det ikke nødvendig å gjøre utskiftninger eller ytterligere tilpasninger på selve forskalingen. Siden forskalingen også var utstyrt med tak som skjermet for vær og vind var det fine arbeidsforhold for de som utførte arbeidet.

Det negative med utførelsen av metoden ble gjeldene når forskalingen skulle flyttes. For å flytte forskalingen krevdes maskineri. Erfaringene viste at maskineri var, tidvis, vanskelig å lokalisere på grunn av at maskinene ofte var tiltenkt andre arbeidsoppgaver. Resultatet ble derfor en del unødvendig ventetid som kunne vært unngått med bedre planlegging og fordeling av bemanningen i prosjektet.

Påføring i lukket forskaling

Den lukka forskalingen var den mest utfordrende metoden rent praktisk. Fordi forma var avhengig av dimensjonene på røret, måtte den tilpasses nøye rundt rørperiferien. Forma var i forkant tilpasset en viss høyde fra grøftebunn og opp til røret, og dersom høyden ikke stemte i praksis resulterte det i at forskalingen ikke ble tett rundt røret. Metoden var også ømfintlig for ujevnheter i grøftebunnen. Skummet kunne trenge ut fra forma, og ekspandere fritt i uønska retninger.

Metoden med lukket forskaling var avhengig av maskineri. Maskineri var nødvendig både for å åpne og lukke forma, samt forflytte den langs rørtraseen. Ved åpning av forma, etter at skummet hadde fastnet til, viste det seg dessuten at det var nødvendig med stor kraft for å få forma til å slippe fra skummet. Resultatet var at forma tok skade av de kreftene den ble påført.

Påføring direkte på røret

Påføring direkte på røret var metoden som krevde minst ressurser for å gjennomføre. For selve utføringen var det ikke nødvendig med annet enn to personer for å håndtere utstyret. Utenom oppstilling av utstyret krevdes heller ikke maskineri. Ved påføring direkte på røret var det derfor mulig å oppnå økt effektivisering sammenlignet med forskalingsmetodene. Metoden krever heller ikke tilpasning til rørdiameteren da skummet sprøytes direkte på røroverflaten.

3.3.2 Kvalitet

Kvaliteten på skummet som ble påført ble utviklet i takt med prosjektets gang. Den første tiden inneholdt en bratt læringskurve hva det angikk kvalitet, og faktorer som måtte tas hensyn til. For eksempel ved gjennomføring av begge forskalingsmetodene var det flere begrensninger som ikke enda var gjort rede for, blant annet kriteriet for å oppnå god heft. For at skummet skal hefte godt mot røret må røroverflaten holde en temperatur på $>15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tiltak for å imøtekomme kriteriet ble ikke gjennomført i forbindelse med forskalingsmetodene, og resultatet var heft tilnærmet lik null.

Riktig temperatur på komponentene var en faktor det ble arbeidet mye med. Feilinnstillinger på temperaturen påvirket kvaliteten i den forstand at for lav temperatur resulterte i en mer tyktflytende væske som ble vanskelig å blande. Når komponentene ikke ble tilstrekkelig blandet, førte det til en ufullstendig reaksjon og synlige områder med ren polyol og isocyanat kom til syne. Et slikt tilfelle er gjengitt på figur 26 a). Her er det synlige fargeforskjeller innad i skumtvversnittet sammenlignet med figur b). Figur b) er av skum produsert med høyere temperatur på komponentene. Tilfeller med ufullstendige reaksjoner var spesielt gjeldende i starten av prosjektet i perioden forskalingsmetodene ble benyttet.



Figur 26 Skum påført med ulik temperatur på komponentene a) Temp. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ b) Temp. $45\text{ }^{\circ}\text{C}$

En annen utfordring knyttet til forskalingsmetodene gjorde seg gjeldende når forskalingen ble fjernet. Som nevnt er cellestrukturen viktig for materialets egenskaper. Når forskalingene ble fjernet, ble skummet i kontakt med forskalingen stående med åpne celler. Åpne celler vil absorbere vann i større grad sammenlignet med lukka celler. Hvor stor innvirkning absorpsjonen har, diskuteres senere i oppgaven.

Den lukka forskalingen medførte særegne utfordringer i forhold til kvalitet. Utfordringene var knyttet til å oppnå et jevnt skumtvversnitt rundt røperiferien. Når skummet ble fylt i forskalingen ekspanderte det så raskt at hele formen ikke ble fylt. Det oppsto områder rundt røret der røroverflaten var synlig. Figur 27 viser et skumtvversnitt der metoden med lukket forskaling ble benyttet. I det markerte området er det vist et eksempel på nevnte utfordring – hulrom i skumtvversnittet som gjorde røroverflaten sårbar for ytre påkjenninger.



Figur 27 Hulrom i PU-skummet rundt rørperiferien

Rent kvalitetsmessig var påføring direkte på røret metoden som ga de beste resultatene. Prøvestykkene som ble skåret ut viste et homogent skum uten hulrom eller store celler. På dette tidspunktet var det også blitt informert om kriteriene for å oppnå god heft. Tiltak for å varme opp røret ble gjennomført, og resultatet var et skum som heftet godt mot røroverflaten. Figur 28 viser skumrester på røroverflaten etter at prøvestykket er skåret ut – en indikasjon på god heft.



Figur 28 God heft mellom PU-skum og røroverflaten

Sammenlignet med påføring i åpen forskaling ga ikke sprøyting direkte på røret den samme varmeutviklingen. Ved påføring direkte på røret ble intensiteten på varmeutviklingen naturligvis lavere, fordi det ble påført et tynt lag med skum om gangen. Ved bruk av forskalingsmetoden var volumet av tilsatt skum mye større, og varmeutviklingen ble stor i kjernen av skummet. Resultatet av høy varmeutvikling var synlig i form av grov cellestruktur og store, uønska hulrom.

En annen viktig faktor som gjorde det mulig å oppnå god kvalitet med påføring direkte på røret var at kvaliteten kunne visuelt inspiseres underveis i arbeidet. Feil og mangler ved skummet som ble påført kunne oppdages raskt sammenlignet med de andre metodene. For forskalingsmetodene ble kvaliteten først synlig når forskalingen var fjernet. Tiltak for å rette opp i feil ble en mer omfattende oppgave.

Vann og fukt er faktorer som har stor innvirkning på kvaliteten. For å unngå at komponentene kommer i kontakt med vann under selve reaksjonen, sørges det for en tørr overflate for komponentene å reagere på. Dette gjelder både røroverflaten og overflaten mot grøftbunn. Med bruk av forskaling ble problemet løst ved å benytte en plastduk under røret, over fjellmassene i bunn. Ved flere av løsningene foregikk dessuten påføringen under tak. For påføring direkte på røret var det i større grad utfordrende å sørge for tørr røroverflate for skummet å reagere på, da det enten krevde arbeid under tak eller kun i nedbørsfrie perioder.

Vann vil også kunne skape problemer etter at reaksjonen er gjennomført, da i form av fryse-/tinesykluser. Påføring direkte på røret er den eneste metoden som etterlater overflaten med lukka celler og en beskyttende "hinne" som hindrer vannet i å trenge inn. Hinnen er gunstig for levetiden, siden det antas at skummet ikke må stå imot de samme påkjenningene fra gjentatte fryse-/tinesykluser.



Figur 29 Overflate med "hinne" som beskytter vannet mot å trenge inn

3.4 Vurdering av pilotprosjektet

3.4.1 Gjennomføring

Gjennomføringen av pilotprosjektet var i aller høyeste grad nødvendig for videre utvikling av metoden. Prosjektet avdekket praktiske problemer ved utførelse, og åpnet samtidig for muligheten til å utarbeide løsninger. Etersom arbeidet var forskningsbasert var det også rom for prøving og feiling underveis. Alle de involverte partene var innforstått med at det var nødvendig å prøve ut ulike metoder for å kunne finne den mest gunstige løsningen.

Den største utfordringen i prosjektet var værforholdene. Værforholdene var utfordrende både for metoden, men også for prosjektet i sin helhet. Grunnet prosjektets geografiske plassering på Laksefjordvidda i Øst-Finnmark var det rimelig å forvente en tidlig vinter. På grunn av vinterens tidlige ankomst ble ikke hele rørgata skumlagt – noe som i utgangspunktet var ønskelig.

Ved ferdigstilling av arbeidet var ca. 300 m. av rørgata lagt med PU-skum som omfyllingsmasse. Arbeidet bærer preg av en bratt læringskurve, og skummet som ble lagt har en synlig økning i kvalitet i takt med prosjektets gang.

Prosjektet har tjent sin hensikt, og kunnskapsnivået angående PU-skum som omfyllingsmasse har økt betraktelig for de involverte partene. Underveis ble det avdekket begrensninger for påføringsmetoder, og andre utfordringer knyttet til anleggsarbeidet som ble utført i praksis.

I vedlegg 3 er det gjengitt bilder fra byggeperioden ved Lille Måsevann. I tilknytning til hver av bildene finnes også en kort, forklarende tekst.

3.4.2 Usikre forhold

Prosjektet har flere usikre forhold som kan ha hatt innflytelse på utvikling av metoden og på resultatene som ble oppnådd. I påfølgende punkter er noen av faktorene gjengitt.

Læringsutvikling

De involverte i prosjektet hadde liten, eller ingen, erfaring med metoden i praksis. Resultatet var en meget bratt læringskurve underveis i prosjektet, og som en følge av kunnskapsutviklingen ble ikke de ulike metodene for påføring gjennomført med de samme forutsetningene rent kunnskapsmessig. I den første perioden da det ble brukt forskaling var det for eksempel ikke kjent at røroverflaten måtte holde en temperatur over 15 °C for å oppnå heft. Hadde det vært kjent på et tidligere stadium ville forutsetningene for å oppnå god kvalitet, i form av heft, vært annerledes.

De involvertes ønske om å lykkes med metoden

I tillegg til fagarbeidere var både administrasjonen fra entreprenørens side, og representanter fra byggherre til stede på anleggsplassen. De involverte, på alle plan, har en påvirkning på sluttresultatet. En vesentlig faktor for usikre forhold i prosjektet er enkeltpersoners ønske om å lykkes med metoden. I forkant av et forskningsprosjekt har folk gjerne gjort opp meninger om metodens funksjonalitet før arbeidets start. En negativ holdning vil kunne påvirke utviklingen i en uheldig retning.

Tidspress

Prosjektet hadde oppstart sommeren 2016. Testing og gjennomføring av påføring av skum ble grunnet forsinkelser igangsatt på sensommeren, og fortsatte utover høsten. Som tidligere nevnt er Finnmarksvidda utsatt for tøffe værforhold, og det var ønskelig å ferdigstille prosjektet i forkant av første snøfall. Mot sluttfasen av prosjektet ble det derfor et tidspress for å bli ferdig før vinteren. Tidspresset kan ha ført til at hver metode for påføring ikke ble utarbeidet godt nok.

Operatør for påføring av skum

Gode resultater avhenger i stor grad av at den som utfører arbeidet med påføring av skummet er erfaren med arbeidet, og har god kunnskap til pumpen og selve innstillingene på maskinen. Arbeidet er også fysisk utfordrende og krever en viss kondisjon og utholdenhet. Operatørens erfaring og kyndighet til å utføre arbeidet vil i stor grad være en faktor som påvirker det endelige resultatet, effektivitet og framdrift.

Sammenligning av kvalitet

Kvaliteten på skummet endret seg i stor grad i løpet av prosjektet. Skummet hadde en gradvis økning i kvalitet i takt med ny kunnskap, og erfaringer gjort underveis. På grunn av den økte kunnskapen er det vanskelig å sammenligne kvalitet opp mot hvilken metode for påføring som ble benyttet. For mange faktorer spiller inn på kvaliteten til at én metode kan utnevnes som årsak til dårligere kvalitet. Kvaliteten som ble oppnådd kan sies å være et resultat av kunnskapen som var tilegnet på det aktuelle tidspunktet, og ikke metoden som ble benyttet.

Fukt og nedbør

Fukt og nedbør har en negativ innvirkning på kvaliteten til skummet dersom reaksjonen mellom komponentene blir påvirket av det. Fukt er enkelt å overse, og det er godt mulig fukt har vært innblandet i reaksjonen mellom komponentene uten at det er blitt lagt merke til. En slik situasjon vil være negativt for sluttresultatet, siden kvaliteten blir umiddelbart dårligere.

Kritisk temperatur på røroverflaten

For å oppnå heft mellom røroverflaten og PU-skummet, ble det informert om at røroverflaten må holde en temperatur over 15 °C. Verdien var ukjent inntil metoden med påføring direkte på røret ble gjennomført. Når røret ble varmet opp til tilstrekkelig temperatur, ble det oppnådd god heft mellom røroverflaten og skummet. Selv om tiltak for å varme opp røroverflaten ikke ble gjennomført for de andre påføringsmetodene, er det rimelig å anta at en ville oppnådd de samme resultatene ved oppvarming av røroverflaten.

I senere forsøk utført av Aaker (2017) viser det seg at den oppgitte temperaturen ikke resulterer i ønsket heftkapasitet, og at røroverflaten må varmes opp ytterligere. Funnene viser at temperatur lik 22 °C er tilstrekkelig. Den nye verdien for nødvendig temperatur omtales senere.

Andre faktorer som kan ha innvirket på kvaliteten

Fra fabrikk kan rørene som ble benyttet ha blitt behandlet med midler som motvirker heft mellom rør og skum. På anleggsplassen er det sannsynlig at rørene har blitt tilgriset med smuss og pakningsfett ved montering. Smuss og fett har en negativ innvirkning på heftkapasiteten. Slike faktorer er lett å overse, men bør tas høyde for.

I pilotprosjektet ble bendene vasket med aceton for å fjerne smuss og fett før PU-skummet ble sprøytet på. Hvor stor påvirkning tiltaket med å vaske røroverflaten har hatt er vanskelig å anslå, grunnet at samme rørlengder også ble varmet opp nettopp for å oppnå god heft.

4. Vannabsorpsjon

4.1 Bakgrunn

I gjennomføringen av prosjektet ved Lille Måsevann ble skummet påført med ulike metoder. Som nevnt vil flere av metodene etterlate åpne celler i overflaten på skummet. Skumleverandør Covestro informerte om at det ikke hadde blitt utført tester der vannabsorpsjonen (over lengre tid) ble undersøkt, og at innvirkningen en eventuell absorpsjon har på kvaliteten til skummet ikke er blitt fastslått.

I forbindelse med arbeidet som ble utført ved Lille Måsevann ble det skåret ut prøvestykker med PU-skum langs rørgata. Prøvestykkene var av ulik kvalitet, der noe kan karakteriseres som "dårlige" enn annet. I noen tilfeller var cellene desidert mer synlige sammenlignet med andre tilfeller. Variasjonen i cellestruktur tyder på stort sprik i densitet.

Thirumal et al. (2008) gjennomførte forsøk som viser at densitet og vannabsorpsjon har en stor sammenheng, og det er derfor ønskelig å undersøke i hvor stor grad vannabsorpsjon er avhengig av densiteten.

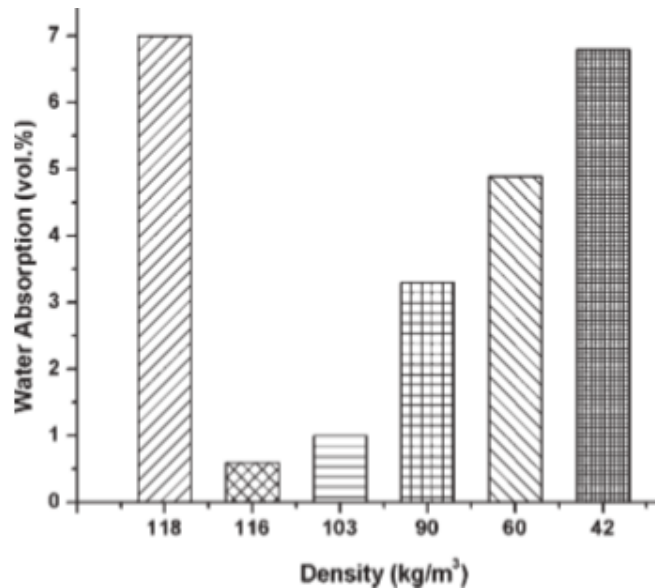
4.2 Gjeldende kunnskap og standarder

For kontrollering av vannabsorpsjon har ASTM International (2006) publisert en standard D 2842 – 06 "Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastic" gjeldende for stivt skum (ASTM International, 2006). Metoden er omfattende, og inkluderer både bruk av destillert vann og konstante temperaturer både i luft og vann. En kort gjenfortelling basert på framgangsmåten i standarden er gjengitt under.

Metoden går ut på å senke en materialprøve med gitte mål ned i et vannbad. I forkant av vannbadet skal prøvestykket utsettes for en konstant temperatur på 50 °C i 24 timer. I vannbadet står prøven med et konstant vanntrykk. For å forhindre at prøvestykket flyter opp plasseres prøven i en anordning slik at den holdes nede, men samtidig får vannpåkjenning på alle sideflatene. Prøvestykket er under vannpåkjenning i 96 timer før det veies og måles.

Prøven legges deretter i vannbad med de samme forutsetningene som ved forrige gjennomføring. Etter nye 96 timer veies prøven på nytt. Endringen i vekt forteller om materialets evne til å absorbere vann. Prøven er nedsenket i totalt åtte døgn. For videre utdypning av metoden henvises det til standarden.

Thirumal, et al. (2008) publiserte artikkelen "Effect of Foam Density on the Properties of Water Blown Rigid Polyurethane Foam". Artikkelen inneholder en beskrivelse av forsøk basert på vannabsorpsjon i hardt PU-skum, og følger standarden til ASTM International. Figur 30 er gjengitt fra rapporten til Thirumal et al. (2008), og viser vannabsorpsjon for PU-skum med ulik densitet.



Figur 30 Resultater fra vannabsorpsjonstest med ulike densiteter (Thirumal, et al., 2008)

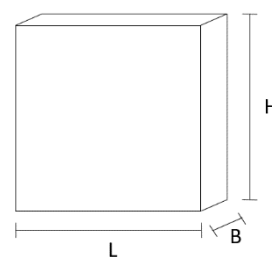
Figur 30 viser en klar sammenheng mellom vannabsorpsjon og skummets densitet. Densitet på 116 kg/m³ resulterte i en absorpsjon på 0,6 vol%. Til sammenligning resulterte densitet på 42 kg/m³ i 6,8 vol% vannabsorpsjon. Ut i fra resultatene knyttes det en sammenheng mellom densitet og materialets egenskap til å absorbere vann – skum med lavere densitet absorberer vann i større grad, sammenlignet med skum med høyere densitet. Absorpsjonen knyttes dessuten direkte opp mot cellestrukturen, og andel åpne- og lukka celler i materialet. Cellenes veggtykkelse vil også være av betydning (Thirumal, et al., 2008).

4.3 Metode og fremgangsmåte

Gjennomføringen av forsøket baseres på standarden til ASTM International (2006). For praktiske årsaker og gjennomføring er det gjort noen forenklinger som gjør at metoden går i viss grad bort fra den opprinnelige standarden.

Prøvestykkene ble skåret ut til å passe målene:

- B = 100 mm
- H = 100 mm
- L = 100 mm

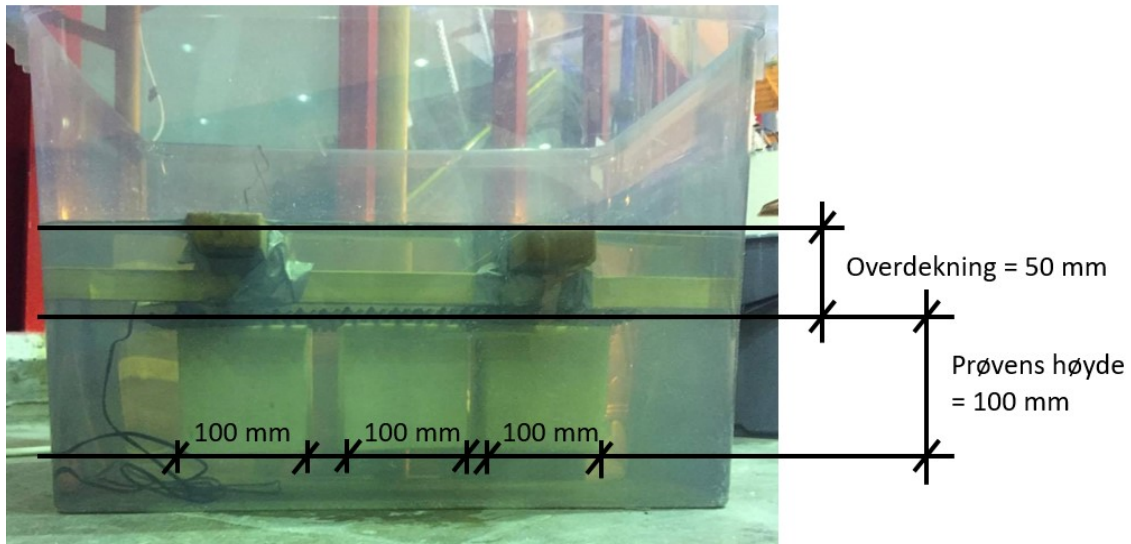


Figur 31 Prinsippskisse av prøvestykker

Totalt ble det skåret ut tre prøvestykker. De utvalgte prøvestykkene ble valgt på grunnlag av synlig variasjon i cellestruktur ved visuell bedømmelse ut fra materialets farge og struktur. Prøvene er vist som en del av figur 60-63 (prøve 7, 17 og 30). Kvaliteten kategoriseres som "god", "middels" og "dårlig" basert på nevnte faktorer, der homogen farge og ikke-synlig cellestruktur betegnes som god kvalitet i denne sammenhengen. Dårlig kvalitet indikerer et materiale med synlige celler, og ujevn fargefordeling i materialet. Ujevn farge er en indikator

på at komponentene ikke er godt nok blandet sammen, og at det har oppstått en ufullstendig reaksjon mellom komponentene.

Vekten til prøvestykkene ble målt i tørr tilstand, og densitet for hvert prøvestykke regnet ut. Målingene ble gjennomført i romtemperatur $\approx 21^\circ\text{C}$. Deretter ble prøvene senket ned i vannbad. Det ble benyttet springvann i gjennomføringen av forsøket – ikke destillert vann som forklart i standarden.



Figur 32 Oppsett av forsøk

For å unngå at prøvene skulle flyte opp til overflaten, ble prøvene holdt nede av en rist. Prøvene ble senket ned slik at de hadde en overdekning på 50 mm med vann, som beskrevet i standarden. Alle sidene av prøvestykkene ble utsatt for vannpåkjenning. Luftbobler som hang fast på sidene av prøvestykkene ble fjernet ved å banke forsiktig på prøvenes overflate.

De første to timene ble det gjennomført kontrollmålinger. Prøvene lå deretter urørt i vannbad i 96 timer. Etter fire døgn i vannbad ble prøvestykkene tatt opp fra vannbadet. Sideflatene ble tørket for å fjerne overflødig vann, og prøvene veid på nytt før de igjen ble lagt ned i vannbad. Prøvene lå ytterligere 96 timer i vann.

Etter 96 timer ble prøvene veid for siste gang. Vannabsorpsjonen ble regnet ut som en funksjon av vekt (før og etter vannbad) og prøvens volum.

4.4 Resultat

Det er en synlig variasjon i cellestrukturen på de aktuelle prøvestykkene. For prøvestykke 7 er cellene meget godt synlige. Prøvestykke 30 befinner seg i andre enden av "skalaen", og har mye finere cellestruktur. Variasjonen gjenspeiles i prøvenes densitet, se tabell 3. Kvaliteten på skummet som ble produsert i prosjektet var økende, og prøvenes nummer gjenspeiler tidspunktet prøven ble tatt. Lavt tall betyr tidlig i prosjektet og høyt tall betyr sent.

Tabell 3 Beskrivelse av prøvestykkene og prøvenes densitet

Prøve nr.	Beskrivelse	Volum cm ³	Vekt 1 g	Densitet kg/m ³
7	Meget godt synlige celler	1000	51	51
17	Finere cellestruktur, men fortsatt synlige celler	1000	56	56
30	Meget fin cellestruktur. Vanskelig å få øye på cellene	1000	78	78

Prøvestykket nr. 30 har høyest densitet, noe som tilsier at samlet volum med luft er mindre for den aktuelle prøven. Etter 96 timer i vannbad viser målinger foreløpig vannabsorpsjon gjengitt i tabell 4. Vannabsorpsjon, W_A , regnes ut som volumprosent etter følgende formel (ASTM International, 2006):

$$W_A = \frac{Vekt_{Etter} - Vekt_{Før}}{Volum} * 100$$

Tabell 4 Vannabsorpsjon etter 4 døgn i vannbad

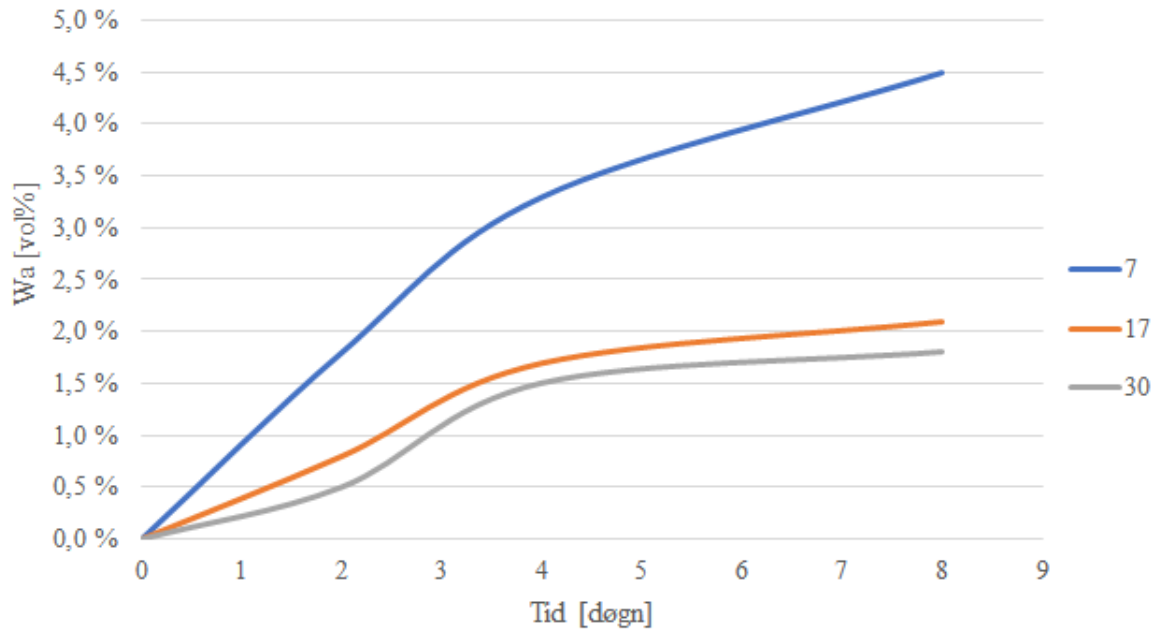
Prøve nr.	Volum mm ³	Vekt 1 g	Vekt 2 g	Vannabsorpsjon, W_A vol%
7	1000	51	84	3,3
17	1000	56	75	1,9
30	1000	78	93	1,5

Etter totalt 8 døgn i vannbad regnes den nye verdien for vannabsorpsjon ut. Verdien tar utgangspunkt i den nye vektøkningen, vekt 3, og opprinnelig vekt.

Tabell 5 Vannabsorpsjon etter 8 døgn i vannbad

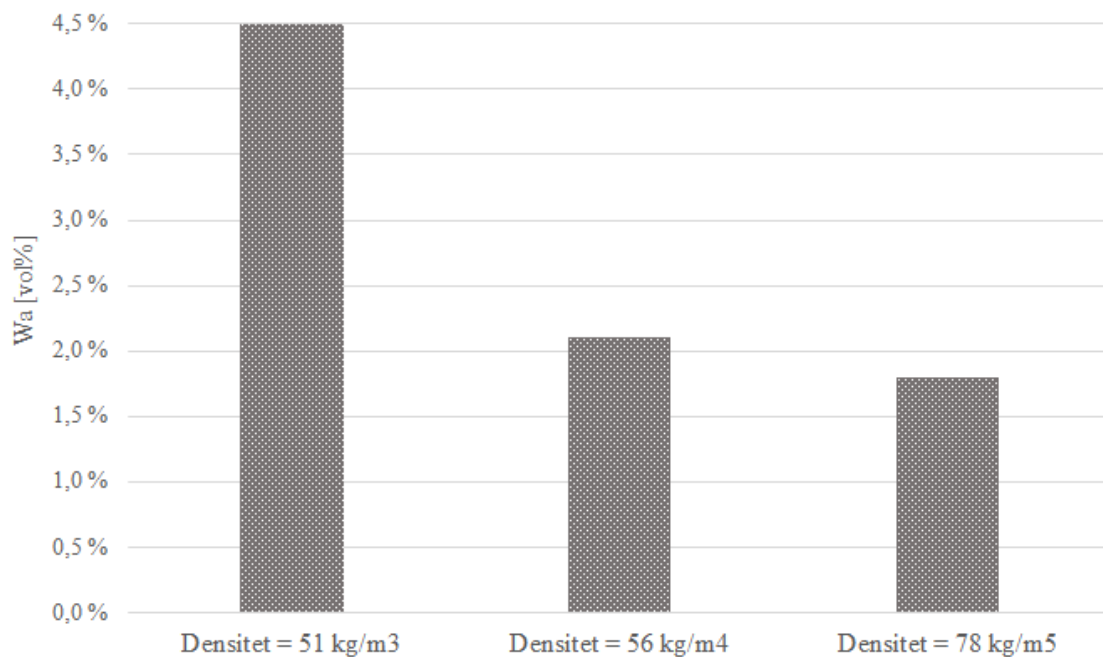
Prøve nr.	Volum mm ³	Vekt 1 g	Vekt 3 g	Vannabsorpsjon, W_A vol%
7	1000	51	96	4,5
17	1000	56	77	2,1
30	1000	78	96	1,8

Etter åtte døgn i vannbad viser resultatene at prøvestykkene absorberer ytterligere fuktighet – men i ulik grad. Fra sist måling har prøve 7 absorbert ytterligere 1,2 vol% vann. Til sammenligning har prøve 17 absorbert 0,4 vol% og prøve 30 0,3 vol%. Grafen på figur 33 viser utviklingen i daglig vannabsorpsjon.



Figur 33 Daglig utvikling av vannabsorpsjon

Figur 34 viser sammenhengen mellom vannabsorpsjon og densitet. For enklere sammenligning er grafen utformet på samme måte som resultatene publisert av Thirumal et al (2008).



Figur 34 Sammenheng mellom densitet og vannabsorpsjon

Grafen viser at vannabsorpsjonen er økende for lavere densitet.

4.5 Diskusjon

Ut fra målingene som er gjort er det tydelig at materialet absorberer vann. Både for målingene gjort etter fire og åtte døgn viser resultatene i tabell 4 og tabell 5 at vannabsorpsjonen er synkende for økende densitet. Resultatene varierer fra 4,5 vol% for laveste densitet på 51 kg/m^3 , til 1,8 vol% for densitet på 78 kg/m^3 . Forskjellen tilsvarer 2,7 vol%.

Fra figur 33 er det synlig at materialet med lavest densitet har et høyere vannopptak sammenlignet med de andre prøvestykkene. Grafene for vannabsorpsjon for samtlige av prøvestykkene følger den samme trenden i forsøksperioden, men prøve 7 har et høyere vannopptak fra dag én. Dette skyldes trolig prøvestykkets lave densitet, og andel store celler.

Sammenlignet med resultatene som er presentert i artikkelen til Thirumal et al. (2008) er verdiene for vannabsorpsjon i forsøket noe lavere. Ut fra figur 30 er det forventet at PU-skum med densitet i området $50\text{-}60 \text{ kg/m}^3$ vil ha en absorpsjon mellom 5-6 vol%. Resultatene fra oppgaven viser et lavere tall. Den lavere verdien kan skyldes det faktum at prøvestykkene holdes nede i vannbadet på en annen måte enn i nevnte artikkel, og at risten som benyttes hindrer vanninntrenging på den aktuelle siden. Nevnte årsak ses på som et lite usikkerhetsmoment.

Det knyttes en større sannsynlighet til at cellestrukturen til PU-skummet i forsøket er ulik cellestrukturen på skummet benyttet i forsøkene til Thirumal et al (2008), og at dette er en påvirkende årsak til variasjonene i resultatene. Thirumal et al (2008) informerer ikke om andelen lukka eller åpne celler i PU-skummet som er benyttet i forsøkene, og det kan tenkes at forskjellen i vannabsorpsjon skyldes variasjoner i andelen lukka celler. Som nevnt tidligere vil også cellenes veggtykkelse påvirke vannabsorpsjonen. En større veggtykkelse vil gjøre det vanskeligere for vannet å trenge gjennom – det kan også være en medvirkende faktor til at resultatene i forsøket viser en lavere absorpsjon. Det er ikke gjort nærmere studier av cellenes veggtykkelse i oppgaven.

De lukka cellene i PU-skummet gjør det vanskeligere for vannet å trenge inn. I tillegg til de lukka cellene vil PU-skummet, i felt, få en "skorpe" som fungerer som en hinne for vanninntrenging. Hinnen kommer når skummet påføres direkte med sprøyteskum, og vil være synlig slik som på figur 29. I forsøket var prøvestykkene vannpåkjent fra alle sidene. I felt vil skummet kun være vannpåkjent fra én side, og siden er i tillegg beskyttet med den omtalte "hinnen". Det er derfor sannsynlig at den reelle vannabsorpsjonen vil være lavere enn det resultatene i forsøket viser.

Forsøket ble gjennomført i et tidsrom på åtte døgn. I virkeligheten vil PU-skummet ligge eksponert for fukt under hele rørgatas levetid, og påkjeningen vil naturligvis strekkes mye lengre enn 8 døgn. Ut fra resultatene i forsøket kan det tolkes som at absorpsjonen jevnes ut, og at størst absorpsjon er knyttet til første vannpåkjenning. Ved første vannpåkjenning vil de åpne cellene trekke til seg vann, mens for de lukka cellene vil det ta lengre tid. Hvor motstandsdyktige de lukka cellene er for diffusjon vil være avgjørende for absorpsjon over lengre tid.

Det er knyttet få usikkerhetsmomenter til gjennomføringen av forsøket, da forsøket baseres på en enkel gjennomføringsmodell og det faktum at lite utstyr er benyttet. Vekt med gradering på ett gram var det eneste digitale verktøyet som ble brukt, og denne ble kalibrert opp mot en annen vekt. For å fastslå at vekten viste riktig verdi ble det benyttet et lodd med kjent vekt. Det er knyttet liten usikkerhet til målefeil av prøvestykkenes vekt.

Forsøket ble gjennomført med tre prøvestykker. Prøvestykkene ble valgt ut på visuelt grunnlag ut fra synlig cellestruktur og variasjon i densitet. Tre prøvestykker er et beskjedent antall for å kunne trekke sikre sammenhenger – likevel gir resultatene en indikasjon på vannabsorpsjon i forhold til densitet. Resultatene samsvarer også med tidligere resultater funnet i forsøk publisert av Thirumal et al (2008). De tidligere resultatene validerer resultatene i forsøket.

Forsøket baseres på et oppsett der prøvestykkene blir vannpåkjent fra alle sidene. Resultatene er derfor trolig høyere enn det de vil være i felt, og verdiene for vannabsorpsjon som er oppnådd i forsøket kan oppfattes som "maksimalverdier". Forsøkets hensikt var å avdekke om materialet absorberer vann, og eventuelt hvordan densiteten påvirker absorpsjonen – forsøkets oppsett ga svar på problemstillingene, og oppsettet betraktes som godt. Som nevnt knyttes det i tillegg liten usikkerhet til selve gjennomføringen, og forsøket i sin helhet vurderes som av god kvalitet.

5. Fryse-/tinesykluser

5.1 Bakgrunn

I hele sin levetid vil PU-skummet være nedgravd i bakken, og de årlige sesongvariasjonene vil resultere i både fukt- og frostpåkjenninger. På grunn av manglende litteratur og lite tilgjengelig kunnskap på langtidspåvirkningen av fuktpåkjenning, var det ønskelig å gjennomføre akselererte fryse-/tinesykluser i forbindelse med oppgaven. Forsøkene gir en indikasjon på om fukt og frost er problematisk for metoden i sin helhet, og om de mekaniske egenskapene vil svekkes ved ulike påkjenninger.

I forkant av testing av mekaniske egenskaper, gjennomføres gjentatte fryse-/tinesykluser på prøvestykker med ulik kvalitet. Resultatene vil i første omgang avdekke ulikheter i vannabsorpsjon med tanke på variasjon i kvaliteten på prøvestykkene, og i tillegg synlige endringer som et resultat av påkjenningen. Deretter vil mekaniske tester avklare om påkjenningen har innflytelse på skummets egenskaper.

5.2 Utvalg av prøvestykker

Fra prosjektet ved Lille Måsevann ble et utvalg på totalt 34 prøvestykker skåret ut fra rørgata. Prøvene ble hentet fra ulike steder i traseen, og stykkene bestod av skum med ulik cellestruktur og trolig variasjoner i materialets egenskaper.



Figur 35 Synlige variasjoner i cellestruktur

Prøvene ble skåret ut hver gang det ble gjort endringer ved påføringsmetode, samt endringer i blandeforhold eller temperatur på skummets komponenter. For hvert prøvestykke finnes følgende data:

- Dato for påføring av skum
- Påføringsmetode
- Blandingsforhold mellom komponentene
- Temperatur på komponentene, samt temperatur på slange
- Type skum (pour-skum eller sprøyteskum)
- Lufttemperatur ved påføring
- Luftfuktighet ved påføring
- Værforhold ved påføring

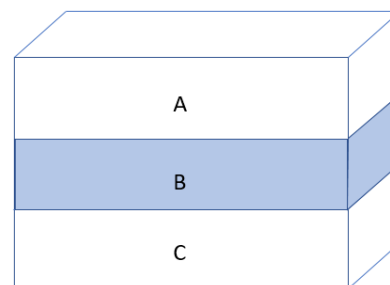
Noen av prøvestykkene har betydelig like forutsetninger. Med *like forutsetninger* menes at skummet ble påført med samme metode, under de samme værforholdene og med samme type skum. For å redusere utvalget av prøvestykker, ble noen av prøvene eliminert fra forsøksoppsettet. Totalt ble 20 prøver inkludert. Prøvene representerer variasjoner i påføringsmetode, skumtype, blandingsforhold, værforhold og temperatur på komponentene.



Figur 36 Gjennomgang av prøvestykker

For å kunne fastslå påvirkningen frost og gjentatte fryse-/tinesykluser har på skummet, ble prøvestykkene delt opp i tre deler og testet med ulike forutsetninger. Ved å gjennomføre flere tester på samme prøvestykke finnes et godt sammenligningsgrunnlag for de ulike funnene.

- A: Testes "som den er".
- B: Testes når prøvestykket er gjennomfrossent.
- C: Testes etter gjentatte fryse-/tinesykluser.



Figur 37 Prinsippfigur for oppdeling av prøvestykker

Tabell 6 viser hvilke tester som ble utført på hvert enkelt prøvestykke. Testene er valgt ut slik at det finnes sammenligningsgrunnlag både for strekk- og trykkfasthet. Tilgjengelig materiale for utskjæring av prøvestykker setter og en fysisk begrensning for hva som er mulig å få til i praksis.

Tabell 6 Oversikt over hvilke prøver som skal gjennomgå de ulike testene

Prøve nr.	A: Ubehandla		B: Nedfrosset		C: Tine/fryse
	Strekkfasthet	Trykkfasthet	Strekkfasthet	Trykkfasthet	Strekkfasthet
2	X	X	X		X
3	X	X	X	X	X
5	X		X		X
7	X	X	X	X	X
9	X		X		X
12	X		X		X
14	X				X
16	X		X		X
17	X	X	X	X	X
18	X	X		X	X
19	X	X			X
20	X				X
21	X				X
22	X				X
25	X	X			X
27	X				X
29	X	X		X	X
30	X	X	X	X	X
31	X		X		X
34	X				X

Tabellen viser at det totalt gjennomføres 50 tester for måling av strekkfasthet, og 15 for trykkfasthet.

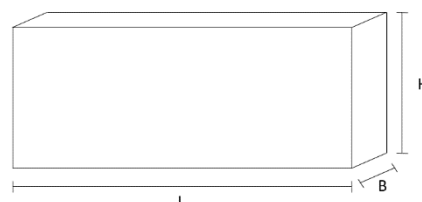
5.3 Metode og fremgangsmåte

Prøvestykkene ble skåret ut til å passe målene:

$$B = 30 \text{ mm}$$

$$H = > 70 \text{ mm}$$

$$L = > 200 \text{ mm}$$

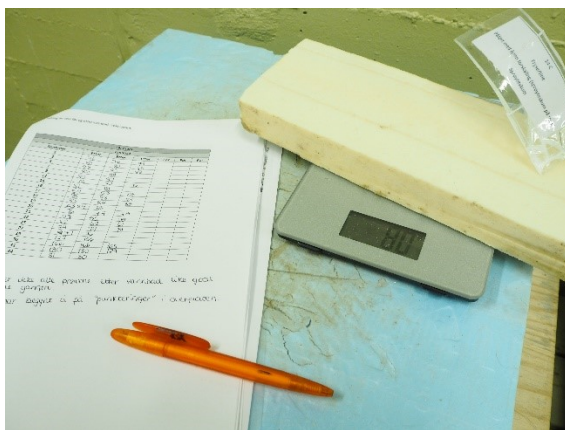


Figur 38 Prinsippfigur av prøvestykker

Prøvenes høyde, H , og lengde, L , er i utgangspunktet uvesentlig for gjennomføringen. Som beskrevet i beregninger for varmeoverføring, antas en uendelig stor flate for gjennomstrømming. Det er derfor bare prøvenes bredde, B , som er av interesse.

Beregningene utført i "2.3 Varmeoverføringsegenskaper" viser at nødvendig tid i fryserom for å oppnå -10°C i kjernen av prøvestykkene er 21,3 minutter. Det er gjort noen antagelser i beregningene, og i praksis overstiger tiden på fryserom den beregnede tiden.

Prøvestykkene ble veid og resultatene loggført skjematisk som vist på figur 39 a). Deretter ble prøvestykkene senket ned i vannbad. Det ble benyttet en beholder med tilstrekkelig volum slik at hele prøvestykket lå dykket, se figur 39 b). På grunn av stor oppdrift ble det lagt en "rist" med vektmotstand for å forhindre prøvestykkene i å flyte opp. Prøvene lå nedsenket i vann i 17 timer.



a)

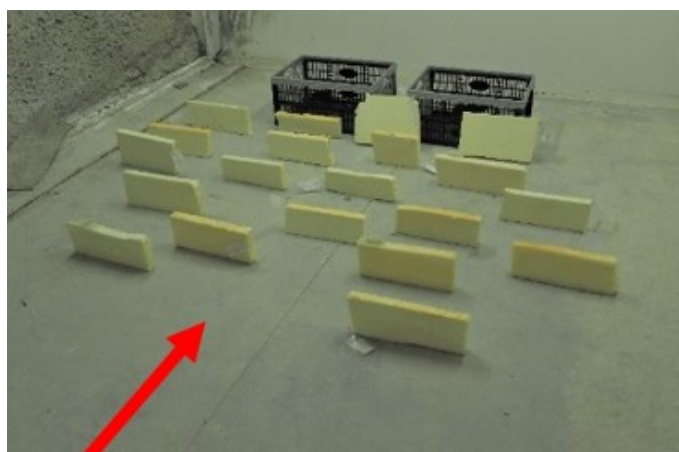


b)

Figur 39 a) Måling av prøvenes vekt b) Prøver lagt i vannbad

Etter vannbad ble overflødig vann tørket av, og prøvene veid på nytt. For å unngå målefeil ble hvert prøvestykke veid tre ganger.

Prøvene ble videre flyttet til fryserom med temperatur -18°C . Temperaturen ble innstilt og overvåket via et elektronisk panel tilknyttet fryserommet. Prøvestykkene ble plassert på fryserommet slik at den største overflaten var eksponert mot viftene. Viftens retning er markert med rød pil på figur 40. Tid på fryserom var to timer. Etter nedfrysing ble prøvene tatt ut av fryserommet for opptining. Opptiningen foregikk i romtemperatur tilnærmet lik 20°C i 6,5 time.



Figur 40 Prøvestykkene plassert på fryserom, vendt mot fryserommets vifter

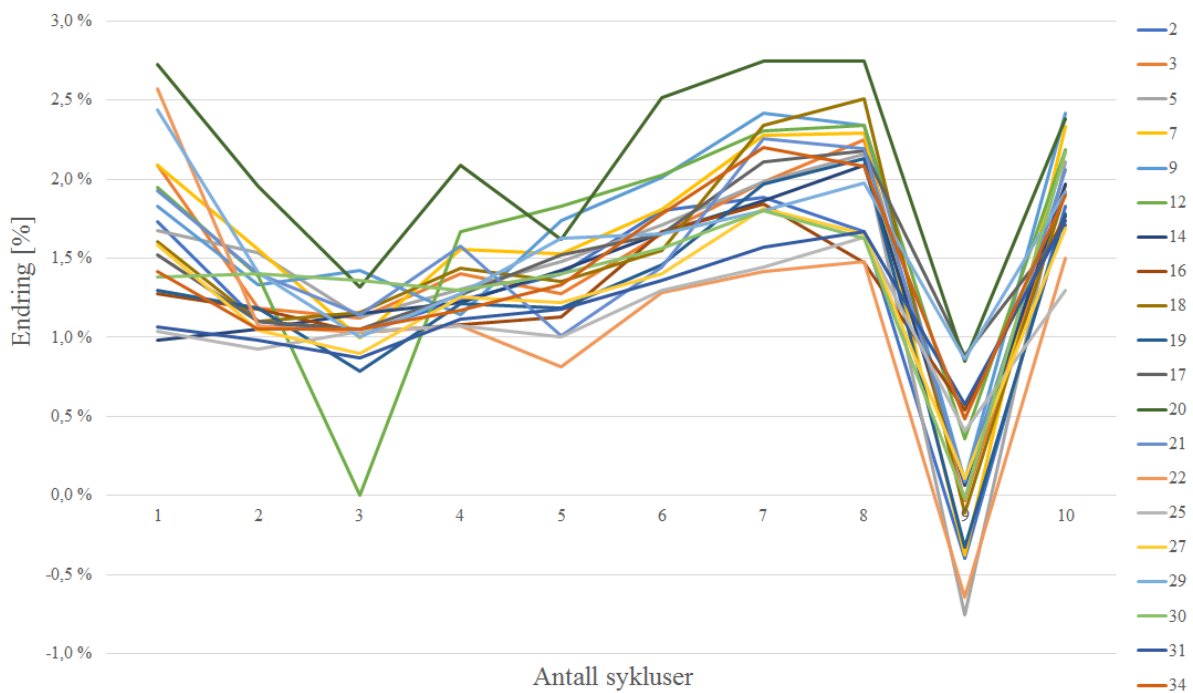
Syklusen ble gjentatt ti ganger.

5.4 Resultat

Prøvene gjennomgikk totalt ti sykluser. For å kunne loggføre vannabsorpsjonen ble vekten til prøvestykkene målt for hver syklus. Vannabsorpsjon er regnet ut som volumprosent ved å benytte samme formel som ASTM International (2006) gjengir i standard D 2842 – 06 "Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastic".

$$W_A = \frac{Vekt_{Etter} - Vekt_{Før}}{Volum} * 100$$

Grafen på figur 41 viser utviklingen i vannabsorpsjon for hvert enkelt prøvestykke. Grafen tar utgangspunkt i variasjonene for hver syklus, og viser en klar trend i hendelsesforløpet. Fallet ved syklus ni skyldes en målefeil og omtales senere.



Figur 41 Trend i daglig vannabsorpsjon

Tabell 7 viser den totale vannabsorpsjonen fra første til siste syklus, samt utviklingen av vanninnhold etter syv døgn med tørking. Densiteten for hvert prøvestykke er også inkludert i tabellen. Verdien for densitet viser sammenheng med skumtypen som er benyttet.

Tabell 7 Total vannabsorpsjon og effekt av tørking

Prøve nr.	Skumtype	Densitet kg/m ³	W _a fra første til siste syklus vol%	W _a etter syv døgn med tørking vol%
2C	Pour-skum	56,0	2,6 %	0,6 %
3C	Pour-skum	50,5	3,4 %	1,0 %
5C	Pour-skum	55,6	3,2 %	-0,1 %
7C	Pour-skum	55,1	3,6 %	0,7 %
9C	Pour-skum	55,8	5,9 %	3,4 %
12C	Pour-skum	54,8	5,8 %	2,1 %
17C	Pour-skum	53,8	3,9 %	1,9 %
18C	Pour-skum	50,8	3,3 %	1,3 %
19C	Pour-skum	52,6	3,4 %	1,3 %
20C	Pour-skum	58,7	3,6 %	0,0 %
21C	Pour-skum	53,9	2,0 %	0,3 %
14C	Sprøyteskum	60,0	6,3 %	0,6 %
16C	Sprøyteskum	61,9	3,8 %	1,4 %
22C	Sprøyteskum	51,4	3,0 %	1,0 %
25C	Sprøyteskum	66,7	2,2 %	0,6 %
27C	Sprøyteskum	64,7	3,0 %	0,8 %
29C	Sprøyteskum	68,2	5,0 %	1,9 %
30C	Sprøyteskum	71,9	5,5 %	1,8 %
31C	Sprøyteskum	68,2	3,5 %	-0,2 %
34C	Sprøyteskum	76,3	4,6 %	2,2 %

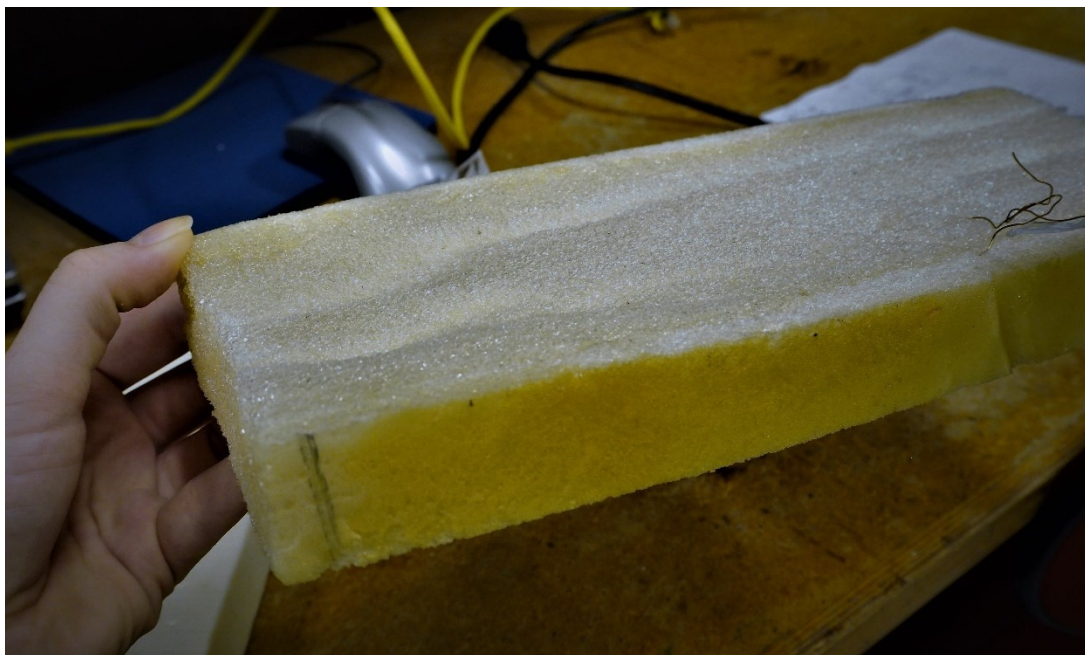
Vannabsorpsjonen varierer fra 2,0 vol % til 6,3 vol% – en forskjell på 4,3 vol%. Etter 7 døgn uten eksponering for vann viser verdiene i tabell 7 at materialet "gir slipp på vannet", altså at materialet tørker.

Det ble gjort visuelle observasjoner for hvordan prøvestykkene reagerte på påkjenningen de ble utsatt for. For prøvestykkene med grovere struktur og godt synlige celler, fremstod materialet som "sprøtt" etter påkjenningen. Det var også synlige endringer i prøvenes form. Figur 42 viser et bilde av prøve nr. 2C. Bildet er tatt etter gjennomføring av tredje syklus, og viser en deformasjon av prøvestykket.



Figur 42 Deformasjon av prøvestykket (avbøyning)

Figur 43 viser prøvestykke 9C. Halvveis i gjennomføringen av syklusene oppsto det ujevnheter i prøvens overflate. Kontrasten på bildet er justert for å synliggjøre de nedsenka områdene på prøvestykket.



Figur 43 Deformasjon av prøvestykket (ujevnheter)

5.5 Diskusjon

5.5.1 Vannabsorpsjon

Grafen på figur 41 viser daglig vannabsorpsjon, og for nesten samtlige av prøvene synliggjøres en klar trend i utviklingen. Som antatt er vannabsorpsjonen stor for syklus én, da de åpne cellene i materialet raskere absorberer vann kontra de lukka cellene.

Videre viser trenden en jevn stigning i absorpsjon. Ved syklus ni vises et synlig dropp i grafen. Den drastiske utviklingen skyldes en feil i måling av vekt. Målingen ble satt på vent, og prøvestykkene ble tilfeldigvis eksponert for varmluft i en periode slik at det forekom en hurtig tørkeprosess. Det er rimelig å anta at korrekte målinger ville korrespondert med utviklingen i økende vannopptak.

Utviklingen viser at vannopptaket er økende for gjentatte fryse-/tinesykluser. Den øverste linjen i grafen (prøvestykke 20), skiller seg ut fra resterende prøvestykker ved at den kontinuerlig har et høyere vannopptak. Prøvestykket er hentet fra skum som ble påført med lukket forskaling, og prøven er den eneste som ble testet fra denne påføringsmetoden. Ved gjennomføring av metoden ble det benyttet fett i forma. Det har ikke lyktes å finne sikre kilder på om fett har innvirkning på skummets egenskaper, men dersom scenarioet sammenlignes med vann kan det tenkes at fett forgreines på samme måte innover i skumtværnsnittet som vann vil gjøre hvis det er tilstede i reaksjonen. Det er derfor sannsynlig at fett har påvirket skummet i en viss grad, men det er usikkert i hvilken grad og hvordan denne innvirkningen er gjeldende.

Thirumal et al. (2008) gjengir resultater i artikkelen som viser sammenheng mellom densitet og vannopptak. Sammenhengen er synlig ved at høy densitet og finere cellestruktur resulterer i et skum som absorberer mindre vann. Sammenhengen er ikke synlig i resultatene som er oppnådd i forsøket her. Fra resultatene kan det virke som at vannopptaket er uavhengig av densiteten. Det har heller ikke lyktes å finne en klar sammenheng mellom påføringsmetode, skumtype eller andre faktorer som kan ha påvirkning på absorpsjonsevnene. Usikkerhetsmomenter som kan være medvirkende til at vannabsorpsjon og densitet ikke korresponderer i forsøket diskuteres under "5.5.3 Usikkerhetsmomenter".

Vannabsorpsjonen for prøvestykkene i forsøket varierer fra 2,0-6,3 vol%. Dersom det ses bort fra densiteten ligger vol% innenfor det samme området som Thirumal et al. (2008) gjengir i artikkelen for densitet i området 42-116 kg/m³. For sammenligning henvises det til figur 30.

Tabell 7 viser også at materialet har evne til å tørke under tørre forhold. Nye vektmålinger ble gjort etter syv døgn, og resultatene er gjengitt i tabell 7. Tallene viser at flere av prøvestykkene nesten har gått tilbake til sin opprinnelige vekt. For prøvestykkene med størst vannabsorpsjon er vanninnholdet fortsatt synlig på vekten, men også her er vekten betraktelig mindre. Det er rimelig å anta at ved opptørking over lengre tid så vil samtlige av prøvestykkene nå sin opprinnelige vekt.

5.5.2 Deformasjon

Prøvestykkene reagerte ulikt på påkjenningen de ble utsatt for. For prøvestykkene med godt synlig cellestruktur ble påkjenningen gjeldende i form av avbøyninger og "søkk" i prøvenes overflate. Spesielt synlig ble deformasjonen på prøve 2C, som vist på figur 42. Avbøyningen kan skyldes ulike årsaker, og er trolig en kombinasjon av flere faktorer.

Prøve 2C består av skum som er påført med lav temperatur på begge komponentene, i tillegg til lav temperatur på slangen. Ut av alle prøvestykkene som ble hentet fra prosjektet ved Lille Måsevann er prøve 2C prøven som består av skum påført med *lavest* temperatur. Ved lave temperaturer vil komponentene ha vanskeligheter med å blandes tilstrekkelig ved påføring, og det er sannsynlig at det har skjedd i området der prøven er hentet fra.

Dersom komponentene ikke blandes tilstrekkelig, vil det forekomme en ufullstendig reaksjon. Resultatet er at polyol og isocyanat som ikke har reagert vil være igjen i skummet, og skummets egenskaper endres i form av at det oppstår en inhomogen cellestruktur. Mest trolig er det en slik variasjon som forårsaker deformasjonene i prøve 2C. På figur 42 er det tydelig at undersiden har gjennomgått en større ekspansjon sammenlignet med oversiden.

Det er også mulig at deformasjonene skyldes ujevn påkjenning underveis i prosessen. En innvirkende faktor på deformasjonen på prøvestykke 2C kan være at den ene langsiden (oversiden) har tørket raskere enn den andre.

For flere av prøvestykkene oppsto det også deformasjoner i form av "søkk" på prøvenes overflate. Et av de mest synlige tilfellene er vist på figur 43. Felles for de aktuelle prøvene som fikk slike deformasjoner er at de er påført med relativt lav temperatur på komponentene og slangen. Deformasjonene kan delvis skyldes ufullstendig reaksjon mellom polyol og isocyanat.

I tillegg til den ufullstendige reaksjonen mellom komponentene, kan det tenkes at "søkkene" oppstår som følge av kollapset cellestruktur. Som tidligere nevnt vil cellene kunne kollapse dersom andelen blåsemiddel blir for høy. Det er også sannsynlig at fryst og ekspandert vann i cellene fører til samme scenario – at cellestrukturen ikke lengre er intakt. Dersom det er tilfelle vil cellene aldri fylles med luft igjen, siden de i utgangspunktet var lukka.

5.5.3 Usikkerhetsmomenter

Som for tidligere absorpsjonsforsøk er "hinnen" som beskytter mot vannabsorpsjon fjernet ved gjennomføringen av forsøket. Det medfører at vann trenger gjennom alle sideflatene på prøvestykkene, og at verdien for absorpsjon mest trolig er høyere enn hva den i realiteten vil være i felt.

Densitet og vannabsorpsjon viste liten, eller ingen, sammenheng i oppnådde resultater. Flere faktorer kan være årsaken til resultatene, blant annet feilaktig målt volum. Felles for prøvestykkene var bredden på 30 mm. Variasjoner både i høyde og lengde gjorde at korrekt volum var vanskelig å beregne. Beregning av volum er trolig det største usikkerhetsmomentet i forsøket.

I tillegg spiller også variasjoner i materialet inn på prøvenes densitet. For de prøvestykkene som er hentet fra skum påført med lav temperatur på komponentene er det sannsynlig at

komponentene ikke har blandet seg, og at det er en medvirkende faktor til at densitet og vannabsorpsjon ikke viser den klare sammenhengen som forventet.

Vekten som ble benyttet i forsøket var den samme som beskrevet i tidligere forsøk. Ved gjennomføringen ble vekten likevel kalibrert på nytt, slik at eventuelle feil kunne avdekkes. Kalibreringen ble foretatt etter samme prinsipp som tidligere – opp mot en annen vekt og med et kjent vektlodd som utgangspunkt.

Prøvene lå i vannbad i 17 timer. Basert på funnene fra tidligere forsøk i oppgaven, skjer det største vannopptaket den første tiden i vannbad. Grunnet tidligere resultater antas det at 17 timer er tilstrekkelig tid for prøven å absorbere nok vann for å iscenesette fryse-/tinesykluser. Det er selvfølgelig mulig at lengre tid i vannbad ville ført til et større vannopptak. Hvor stor innvirkning lengre tid ville ha hatt på resultatene, er ukjent.

Professor Erling Næss ved Institutt for energi- og prosesseteknikk ved NTNU var behjelpelig med beregninger som viste at nødvendig tid på fryserom var 21,3 minutter. Ved gjennomføring av forsøket var prøvene to timer på fryserom – langt mer enn det beregningene viste som nødvendig. Som synliggjort inneholdt noen av prøvene lite luftceller, og materialet fremstod som veldig "tett". Et kompakt materiale vil ha bedre isolasjonsevne, og det vil som et resultat ta lengre tid å senke temperaturen. Økningen i tid ble gjort for å ta høyde for ulikheter i materialeegenskapene til de forskjellige prøvestykkene.

Beregningene var dessuten meget konservative i utgangspunktet, og i løpet av to timer vil prøvene, med stor sannsynlighet, være frossen. Beregningene tar utgangspunkt i at prøvene eksponeres for viften på kjølerommet på en slik måte at luften treffer den største flaten. Det er mulig at prøvene er eksponert ulikt for viften, men at det har liten innvirkning på nedfrysingen siden tiden på fryserom oversteg nødvendig, beregnet tid. På grunnlag av nevnte faktorer knyttes det liten usikkerhet til nedfrysingen av prøvestykkene.

Med bakgrunn i usikkerhetsmomentene betraktes oppsettet av forsøket som godt. Oppsettet baseres på konservative beregninger for varmeoverføring, og det knyttes liten usikkerhet til at skummet har blitt gjennomfrossent i forsøket. Gjennomføringen baseres på et enkelt oppsett, med små rom for feil. Målingene av prøvestykkenes volum er faktoren som det knyttes størst usikkerhet til i selve gjennomføringen. Prøvestykkenes densitet er således en usikker verdi. Densiteten har liten innvirkning på gjennomføringen av forsøket, og er kun relevant for sammenligning mellom densitet og vannabsorpsjon. Forsøkets hensikt var i størst grad "å forberede" prøvestykkene til forsøk på de mekaniske egenskapene, og det vurderes derfor slik at hensikten med forsøket har blitt innfridd på en tilstrekkelig måte, med et forsøk av god kvalitet.

6. Mekaniske egenskaper

6.1 Bakgrunn

Det er tidligere blitt gjennomført mekaniske tester på PU-skum. Materialet som ble testet var fremstilt på laboratorium – ikke i felt. For å undersøke hvilken innvirkning gjentatte fryse-/tinesykluser har på de mekaniske egenskapene til skummet, gjennomføres tester på skum som har vært under påkjenning i forkant. For sammenligning utføres også testene på "ubehandla" skum, altså skum uten noen form for ytre påkjenninger. Prøvene testes på slik måte for å kunne fastslå i hvor stor grad fryse-/tinesykluser er vesentlig for de mekaniske egenskapene.

I tillegg er det betydningsfullt for metoden å undersøke hvordan PU-skummet påvirkes når materialet er frosset. I løpet av året er det rimelig å anta teleforhold i bakken over lengre tid, og at skummet utsettes for påkjenningen det medfører. For å undersøke i hvilken grad påkjenningen påvirker de mekaniske egenskapene, altså skummets egenskaper til å fordele kreftene i materialet i frossen tilstand, gjennomføres samme mekaniske testene på frosset materiale.

6.2 Gjeldende kunnskap og tidligere oppnådde resultater

Av PU-skummets mekaniske egenskaper er det henholdsvis materialets trykk- og strekkfasthet som er av relevans for oppgaven. Trykkfasthet er et mål på materialets evne til å motstå trykkbelastning (Thaulow, 2009). Typiske trykkbelastninger PU-skummet vil utsettes for i løpet av levetiden er den samla summen av vann i røret, rørets egenvekt og overdekningen over røret som hindrer oppdrift. Strekkfastheten er den maksimale spenningen som måles før materialet går til brudd, og beregnes ut fra maksimal kraft benyttet dividert med tverrsnittsarealet kreftene virker på (Støren, 2009). PU-skummets strekkfasthet er spesielt interessant fordi én av skummets oppgaver er å hindre rørene i å gli fra hverandre ved utadretta bendkrefter. I bend vil strekkfastheten i skummet holde rørene sammen, og i praksis fungere som en forankring.

PU-skum har anisotrope egenskaper (Svalesen, 2015). Det vil si at dersom strekk- og trykkfastheten måles parallelt med heveretning vil resultatene avvike fra resultatene vinkelrett på heveretningen. De anisotrope egenskapene begrunnes i den tidligere omtalte cellestrukturen til skummet, og det faktum at cellene er vil få en langstrakt, oval form i heveretningen.

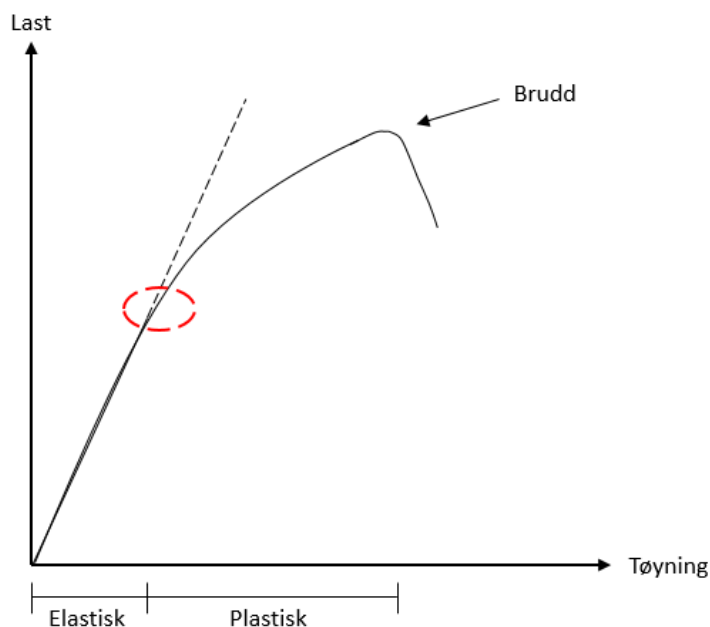
I forsøk knyttet til mekaniske egenskaper er elastisitetsmodulen (E-modulen) til materialet av betydning. E-modulen forteller om materialets stivhet og viser sammenhengen mellom spenning og tøyning (Berge, 2011). Prøvene av PU-skum inkludert i forsøket har ulik densitet og ulik stivhet. E-modulen vil være en interessant parameter for resultatene som oppnås.

E-modulen regnes ut fra følgende formel:

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

Der σ representerer spenningen, E tøyningen og ε E-modulen.

Når materialet utsettes for påkjenninger resulterer det i en elastisk (midlertidig) eller plastisk (varig) deformasjon. Materialet er elastisk når tøyningen er proporsjonal med materialet (Frey Publishing, 2014). Når materialet tøyes videre vil det nå en flytgrense, og ytterligere påkjenning vil resultere i varig deformasjon. Figur 44 er en forklarende figur som viser hendelsesforløpet. Området der materialet når flytgrensen er markert med rød sirkel.



Figur 44 Hendelsesforløp når materialet utsettes for påkjenninger (forklarende figur)

Ved øvrig påkjenning vil materialet gå til brudd. Området der materialet går til brudd omtales som bruddpunkt.

Tidligere oppnådde resultater er vesentlig for sammenligning av egenskapene til PU-skummet. En oversikt over tidligere gjennomførte forsøk, inkludert resultater, er gjengitt under.

6.2.1 Tester utført av Covestro (ved forsøk i Mjøndalen og i laboratorium:

Testene utført av Covestro er utført i henhold til europeiske normer. Hovedresultatene er referert i masteroppgaven til Svalesen (2015), men gjengis også her for oversikt:

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

Figur 45 Resultater fra forsøk utført av Covestro (referert i Svalesen 2015)

Resultatene viser strekkfasthet lik 318 kPa for sprøyteskum, og 353 kPa for pour-skum. Trykkfastheten ble målt til 200 kPa og 374 kPa for sprøyteskum, der densiteten var ulik for prøvene som ble testet. For pour-skum ble trykkfastheten målt til 269 kPa.

6.2.2 Tester utført av Svalesen (2015) ved Materialteknisk laboratorium, NTNU:

Testene utført i tilknytning til masteroppgaven til Svalesen (2015) fulgte ikke de europeiske normene. Testene ble utført som enkle verifikasjonsforsøk ved Materialteknisk laboratorium på NTNU.

For måling av trykkfasthet ble det skåret ut kubiske terninger med målene 100 x 100 mm. Videre ble terningene presset sammen til 90% deformasjon i en Instron materialprøvemaskin (Svalesen, 2015). For oversikt gjengis resultatene knyttet til trykkfasthet her:

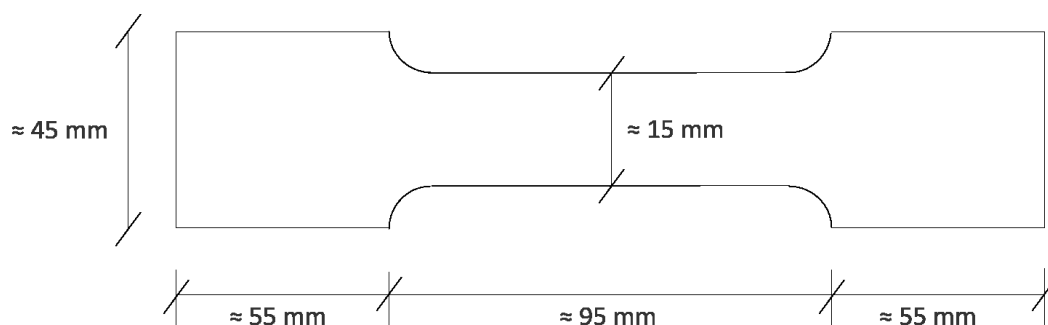
Nr.	E-modul ved 1% tøying	Trykkfasthet ved 1% tøying	E-modul ved 2% tøying	Trykkfasthet ved 2% tøying	E-modul ved 4% tøying	Trykkfasthet ved 4% tøying	Trykkfasthet ved brudd	Last ved 10% deformasjon
1	7,2 MPa	72 kN/m ² 72 kPa	8,6 MPa	171 kN/m ² 171 kPa	7,3 MPa	292 kN/m ² 292 kPa	317 kN/m ² (5,5% tøying)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

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

Figur 46 Resultater fra trykkfasthetsforsøk utført av Svalesen (2015)

Resultatene viser at trykkfastheten ved brudd er 317 kN/m² og 287 kN/m². Forsøkene ble utført på prøver av pour-skum med densitet tilnærmet lik 45 kg/m³. Verdiene er høyere sammenlignet med verdiene Covestro (referert i Svalesen 2015) målte.

For strekkfasthet ble det skåret ut prøvestykker med tykkelse på ca. 10 mm og følgende mål:



Figur 47 Utforming av prøvestykker benyttet i forsøkene til Svalesen (2015)

Prøvestykke ble deretter testet i en Instron materialprøvemaskin. Maskinen påførte prøvestykket strekkrefter med en fast hastighet fram til kreftene var store nok til å framprovosere brudd. For oversikt gjengis resultatene knyttet til strekkfasthet på figur 48.

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

Figur 48 Resultater fra strekkfasthetsforsøk utført av Svalesen (2015)

Totalt ble det gjennomført fem tester på pour-skum. Resultatene viser strekkfasthet ved brudd i området 515-580 kN/m². Verdiene for strekkfasthet er høyere sammenlignet med resultatene fra forsøkene til Covestro (referert i Svalesen 2015).

Resultatene gir et standardavvik på 4,2 % i testene utført på strekkfasthet, og for trykkfasthet et standardavvik < 7%. Det lave standardavviket tyder på lav spredning i dataverdiene, og at metoden for gjennomføring er god. Med grunnlag i tidligere oppnådd standardavvik, gjennomføres tester for strekk- og trykkfasthet med samme oppsett og fremgangsmåte som tidligere gjennomført.

6.3 Fremgangsmåte for testing av trykkfasthet

De 15 prøvestykkene for trykkfasthet ble skåret ut til målene:

L = 100 mm

B = 100 mm

H = 100 mm

For gjennomføring av testene er det viktig at flatene det presses mot er parallelle. Flatene ble derfor nøye kontrollert ved utskjæring.

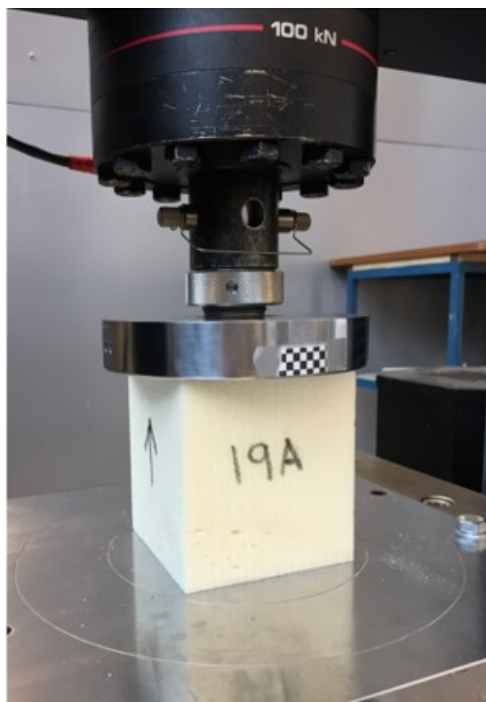
Som vist på figur 49 ble prøvestykkene markert tydelig med nummer og tilhørende bokstav. I tillegg ble prøvene markert med en pil i retningen prøvestykkene skulle presses sammen. Retning for sammenpressing diskuteres nærmere i "6.7.1 Trykkfasthet".

Prøvestykkene testet i frossen tilstand ble forsmåskjært før de ble lagt i fryseren. Dette ble gjort for å sørge for at materialet var frosset i det tidspunktet testene ble gjennomført. Prøvene for trykkfasthet lå i fryseboks med temperatur -18 °C i tre dager. Ved frakt og i tidsrom før utførelse av testene, ble prøvestykkene oppbevart i en isoporkasse for å forhindre opptining.



Figur 49 Markerte prøvestykker som fraktes i isoporkasse for å unngå opptining før testing

Testene ble utført i en Instron materialprøvemaskin med kapasitet på 100 kN, se figur 50. Maskinen ble programmert slik at loggføringen av resultater startet når maskinen nådde en last på 50 N.



a)



b)

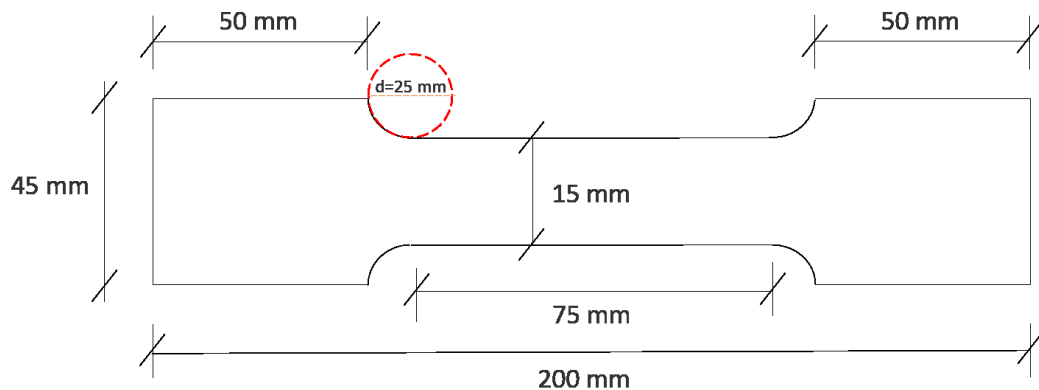
Figur 50 Trykkfasthet testes i en Instron prøvemaskin a) Startposisjon b) Ca. 10% deformasjon

Etter 50 N var nådd ble sammenpressingen gjennomført med en hastighet på 5 mm/min. Maskinen var programmert til å avslutte forsøket etter at 20% deformasjon var nådd. Et dataprogram viste resultatene i form av global forflytning og last over tid.

6.4 Fremgangsmåte for testing av strekkfasthet

I forkant av testing av strekkforsøk på Materialteknisk laboratorium ble 20 prøvestykker utsatt for gjentatte fryse-/tinesykluser som beskrevet i "5 Fryse-/tinesykluser".

Totalt 50 prøvestykker for strekkfasthet ble formskjært på en tilpasset måte. De eksakte målene er vist på figur 51.



Figur 51 Prøvestykker for testing av strekkfasthet formskjæres etter følgende mål og utforming

For det innsnevra området ble det benyttet et sirkulært utstikningsredskap med diameter lik 25 mm. Prøvestykkene utformes sånn at skarpe kanter ikke påvirker resultatene under testing. Prøvenes tykkelse ble skåret ut til å være 10 mm. Hvert prøvestykke ble markert synlig med nummer og tilhørende bokstav. Retningen materialet testes i diskuteres nærmere i "6.7.2 Strekkfasthet".



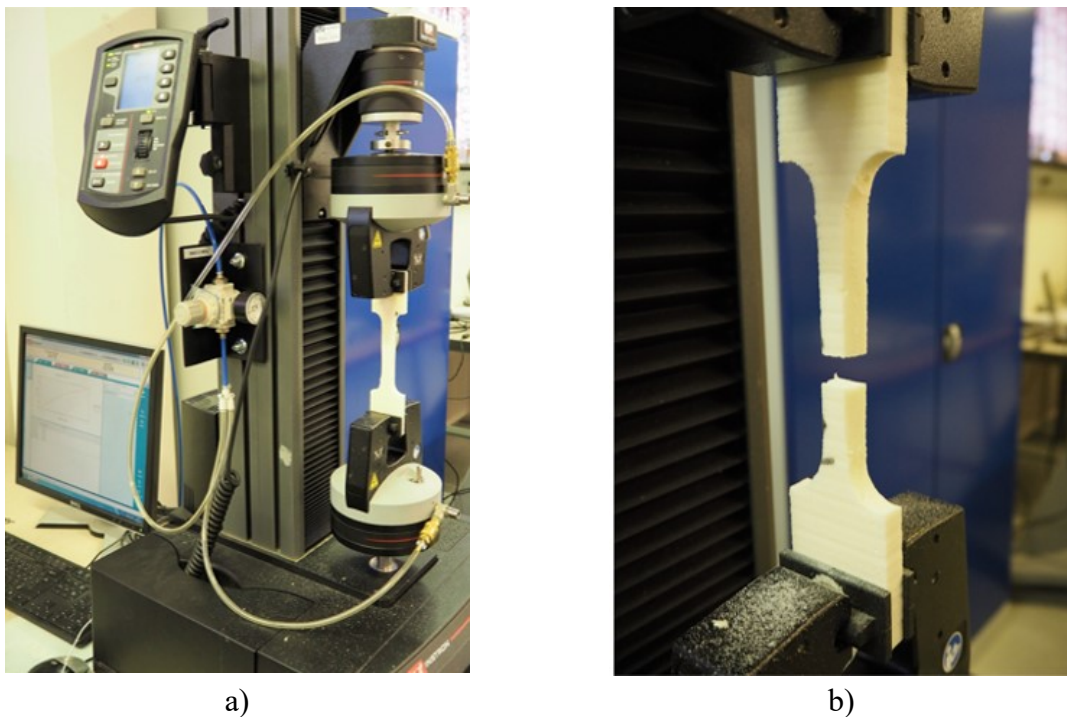
Figur 52 Utskjæring av prøvestykker

Prøvene som ble testet for strekkfasthet i frossen tilstand, ble formskjært før de ble lagt i fryseren. På slik måte var materialet frosset i det tidspunktet testene ble gjennomført. Prøvene for strekkfasthet lå i fryseboks i 14 dager. Ved frakt og i tidsrom før utførelse av testene, ble prøvestykkene oppbevart i en isoporkasse for å forhindre optining.

For gjennomføring av strekktestene ble det benyttet en Instron materialprøvemaskin med kapasitet på 2 kN. For å tilpasse maskinen til prøvestykkene, ble maskinen stilt i en posisjon med lysåpning mellom gripehodene lik 150 mm. Maskinens startposisjon er vist på figur 53 a). Når testen kjørt i gang, beveget det øverste gripehodet seg med en hastighet på 2,1 mm/min. Det nederste gripehodet holdt sin posisjon i ro.

Maskinen ble programmert til å loggføre resultatene etter at en strekkraft på 2 N var nådd. Ved 2 N loggførte maskinens tilhørende dataprogram både global forflytning og last over tid. Kraften ble målt kontinuerlig ved hjelp av en lastcelle montert på maskinen, og forflytningen ble målt av et ekstensiometer (elektronisk måleinstrument).

Prøvestykket ble utsatt for lastpåkjenning med en jevn hastighet, fram til materialet gikk til brudd. Figur 53 b) viser brudd i det innsnevra området på prøvestykket.



Figur 53 Strekkfasthet testes i en Instron materialprøvemaskin a) Startposisjon b) Brudd i materialet

For å regne ut strekkfastheten til materialet kreves arealet der bruddet oppstår. Arealet ble målt, og for kontrollering ble det gjennomført målinger i begge "ender" av bruddet.

6.5 Resultat trykkfasthet

Trykkfasthet ble målt for ubehandla og gjennomfrossent materiale. Informasjon om de ubehandla prøvestykkene er gjengitt i tabell 8.

Tabell 8 Informasjon om de ubehandla prøvestykkene

Prøve nr.	Skumtype	Densitet kg/m ³
2A	Pour-skum	46,6
3A	Pour-skum	47,9
7A	Pour-skum	44,3
17A	Pour-skum	48,6
18A	Pour-skum	47,9
19A	Pour-skum	46,5
25A	Sprøyteskum	61,9
29A	Sprøyteskum	77,6
30A	Sprøyteskum	77,2

Tabell 9 viser resultatene for de ubehandla prøvestykkene. I tabellen er trykkfastheten regnet ut for henholdsvis 1%, 2%, 4% og 10% tøyning, samt trykkfastheten når prøvene gikk til brudd. For plassbesparelse er trykkfasthet forkortet "TF" i tabellen.

Tabell 9 Trykkfasthet for de ubehandla prøvestykkene

Nr.	1 % tøyning		2% tøyning		4% tøyning		10% tøyning		Brudd
	TF kN/m ²	E-modul MPa	TF kN/m ²	E-modul MPa	TF kN/m ²	E-modul MPa	TF kN/m ²	E-modul MPa	TF kN/m ²
2A	21	2,1	58	2,9	93	2,3	119	1,2	90
3A	35	3,5	130	6,5	268	6,7	292	2,9	288
7A	22	2,2	69	3,4	125	3,1	157	1,6	126
17A	30	3,0	115	5,8	234	5,9	233	2,3	240
18A	46	4,6	131	6,6	252	6,3	238	2,4	268
19A	26	2,6	85	4,2	171	4,3	173	1,7	187
25A	56	5,6	177	8,8	362	9,0	392	3,9	433
29A	72	7,2	138	6,9	275	6,9	431	4,3	430
30A	10	1,1	64	3,2	225	5,6	476	4,8	477

Resultatene viser stor variasjon i trykkfasthet for når materialet gikk til brudd. Verdiene varierer fra 90 kN/m² til 477 kN/m². Densiteten til prøvestykkene er også varierende fra 44,3 kg/m³ til 77,6 kg/m³.

Følgende prøvestykker ble testet i frossen tilstand:

Tabell 10 Informasjon om prøvestykker testet i frossen tilstand

Prøve nr.	Skumtype	Densitet kg/m ³
3B	Pour-skum	44,3
7B	Pour-skum	50,1
17B	Pour-skum	50,9
18B	Pour-skum	50,1
29B	Sprøyteskum	78,8
30B	Sprøyteskum	75,1

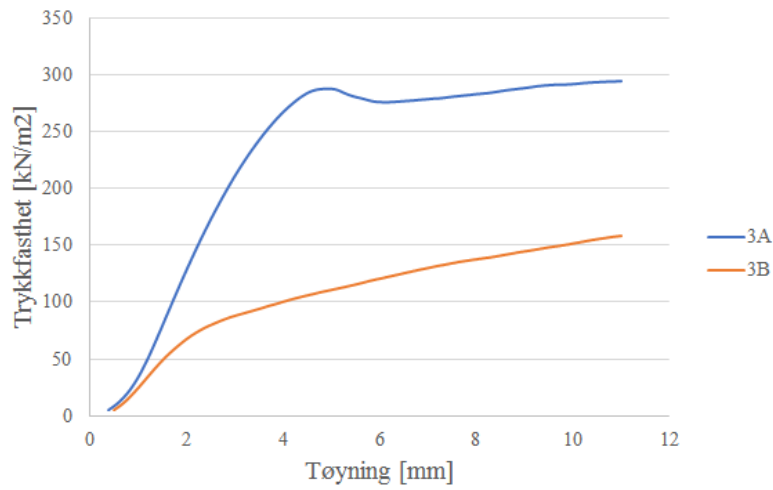
Tabell 11 viser resultatene for prøvene som ble testet i frossen tilstand. De samme parameterne som inkludert i tabell 9 er gjengitt for tabell 11. For plassbesparelse er trykkfasthet forkortet "TF" i tabellen.

Tabell 11 Trykkfasthet for prøvestykker testet i frossen tilstand

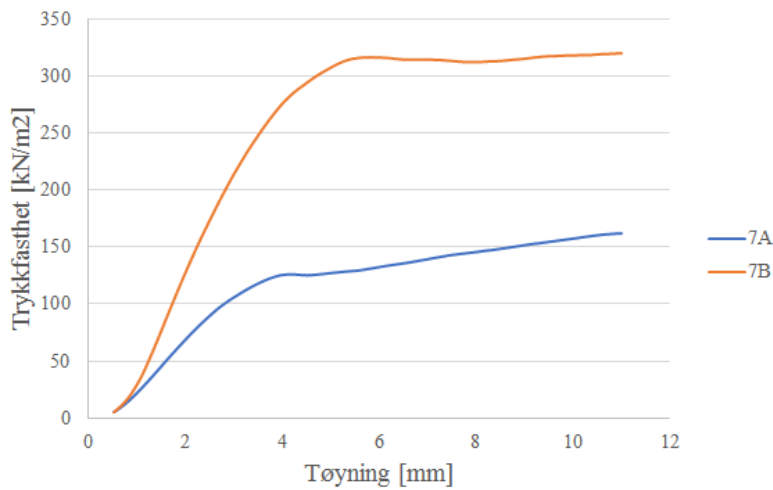
Nr.	1 % tøyning		2% tøyning		4% tøyning		10% tøyning		Brudd
	TF kN/m ²	E-modul MPa	TF kN/m ²	E-modul MPa	TF kN/m ²	E-modul MPa	TF kN/m ²	E-modul MPa	TF kN/m ²
3B	24	2,4	67	3,4	100	2,5	152	1,5	86
7B	37	3,7	129	6,4	277	6,9	319	3,2	315
17B	37	3,7	116	5,8	185	4,6	241	2,4	152
18B	35	3,5	116	5,8	205	5,1	244	2,4	193
29B	33	3,3	108	5,4	278	6,9	487	4,9	478
30B	40	4,0	110	5,5	280	7,0	511	5,1	512

For prøvestykkene testet i frossen tilstand viser også resultatene store variasjoner for når materialet gikk til brudd. Trykkfastheten varierer fra 86 kN/m² til 512 kN/m². Spennet er tilnærmet tilsvarende som for de ubehandla prøvene.

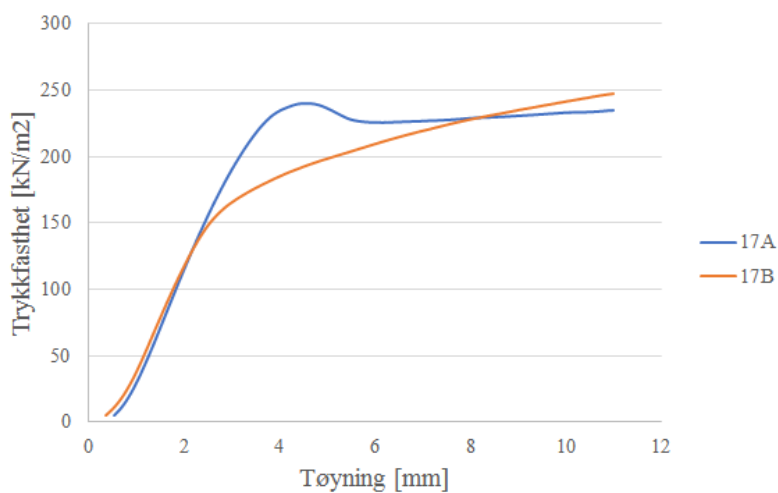
Grafene under viser spennings-tøyningsdiagram for et utvalg av prøvene som ble testet. Ubehandla prøve, A, og gjennomfrossen prøve, B, er vist i samme graf for sammenligning.



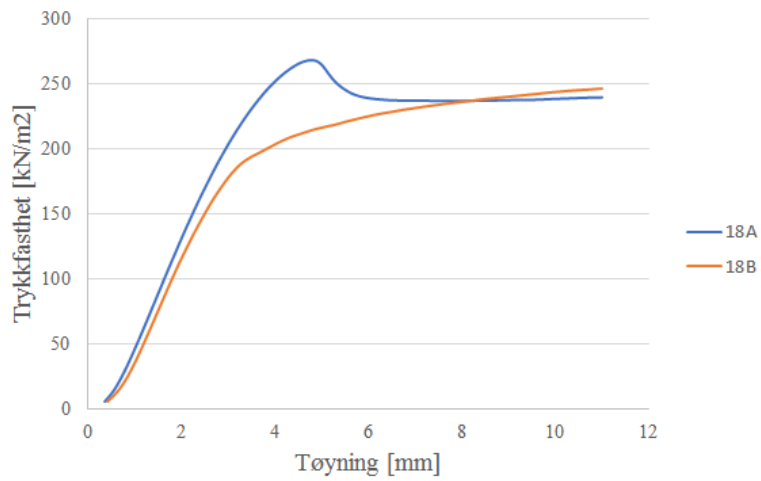
Figur 54 Trykkfasthet prøve 3A og 3B



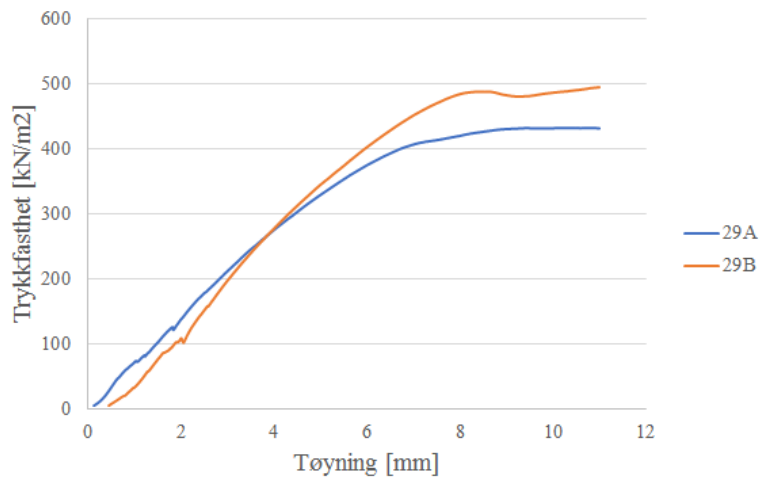
Figur 55 Trykkfasthet prøve 7A og 7B



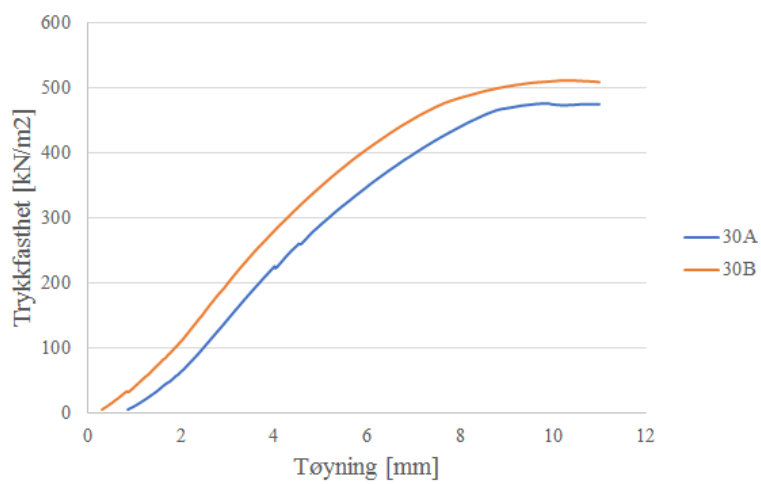
Figur 56 Trykkfasthet prøve 17A og 17B



Figur 57 Trykkfasthet prøve 18A og 18B



Figur 58 Trykkfasthet prøve 29A og 29B



Figur 59 Trykkfasthet prøve 30A og 30B

Grafene på figur 54-59 viser trenden for spenning og tøyning for henholdsvis prøve 3 og 7, 17 og 18 samt 29 og 30. Figur 60-62 viser de aktuelle prøvene opp mot hverandre for sammenligning. Figurene viser at prøvene som har samme trend i grafene, er visuelt særs like kvalitetsmessig.



Figur 61 Visuell sammenligning av prøve 3 og 7

Figur 60 Visuell sammenligning av prøve 17 og 18



Figur 62 Visuell sammenligning av prøve 29 og 30

Det lineære tøyingsforløpet er ulikt for hver av prøvene. Laboratorietekniker Steinar Seehuus forklarte at en bratt kurve indikerer et stivt materiale. Det betyr at dess høyere densitet materialet har, dess brattere er kurven før materialet går til brudd. Deformasjonen i forhold til påført kraft vil minke med et stivere materiale.

6.6 Resultat strekkfasthet

For oversikt over oppnådde resultater er verdiene for strekkfasthet representert i tabeller som skiller prøvene fra hvilken påkjenning de ble utsatt for på forhånd. En enkel oversiktstabell som samsvarer med tabell 6 er gjengitt som oppsummering.

Tabell 12 viser resultatene for strekkfasthet til de ubehandla prøvene. Tabellen viser oppnådd strekkraft ved brudd, og arealet der bruddet oppsto. I tillegg viser grafen tøyning ved brudd – noe som, forenklet, er gjeldende for det innsnevra området. E-modulen er også inkludert.

Tabell 12 Verdier for strekkfasthet for de ubehandla prøvestykkene

A: Ubehandla						
Prøve nr.	Areal mm ²	Kraft ved brudd N	Strekkfasthet kN/m ²	Tøyning ved brudd mm	Tøyning over innsnevret område %	E-modul ved brudd MPa
2	163	63	384	4,3	5,8	8,9
3	171	83	484	6,1	8,2	7,9
5	159	90	562	10,5	14,0	5,4
9	162	108	666	5,1	6,9	12,9
12	164	80	491	5,9	7,8	8,4
14	162	91	559	12,9	17,2	4,3
16	156	86	550	13,8	18,4	4,0
18	158	87	549	10,5	13,9	5,2
19	155	92	598	7,7	10,3	7,7
22	162	88	541	11,7	15,7	4,6
25	179	88	493	5,7	7,6	8,7
27	170	87	510	7,0	9,3	7,3
29	147	115	779	5,8	7,8	13,4
30	164	117	709	6,1	8,1	11,7
31	166	86	520	8,4	11,3	6,2
34	172	147	854	7,4	9,8	11,6

Den laveste strekkfastheten som ble målt for de ubehandla prøvene var 384 kN/m². Gjennomsnittsverdien for samtlige av de ubehandla prøvene gir strekkfasthet på 578 kN/m², med et standardavvik på 116 kN/m². Høyeste strekkfasthet som ble målt, var for prøve 34 – 854 kN/m².

Tabell 13 viser resultatene for prøvestykkene som ble testet i nedfrosset tilstand. Tabellen gir oversikt over strekkfasthet, strekkkraft ved brudd og arealet i tverrsnittet der bruddet oppsto. I tillegg vises registrert tøyning ved brudd og prøvenes E-modul.

Tabell 13 Verdier for strekkfasthet for prøvestykkene testet i frosset tilstand

B: Nedfrosset						
Prøve nr.	Areal mm²	Kraft ved brudd N	Strekkfasthet kN/m²	Tøyning ved brudd mm	Tøyning over innsnevret område %	E-modul ved brudd MPa
2	153	45	294	4,3	5,7	6,9
3	165	66	403	4,9	6,5	8,3
5	116	86	742	6,0	8,0	12,4
7	141	75	537	7,7	10,3	6,9
9	164	67	407	7,2	9,7	5,6
12	171	67	390	10,2	13,6	3,8
16	150	77	511	13,0	17,3	3,9
30	168	85	505	6,4	8,5	7,9
31	147	89	608	8,8	11,8	6,9

Den laveste strekkfastheten som ble målt for prøvene testet i frossen tilstand viser 294 kN/m² – den laveste oppnådde verdien for alle prøvene som ble testet. Gjennomsnittsverdien viser strekkfasthet på 489 kN/m², med et standardavvik på 126 kN/m². Høyeste strekkfasthet ble målt til 742 kN/m².

Tabell 14 viser resultatene for strekkfasthet utført på prøver som gjennomgikk fryse-/tinesykluser. Som tidligere viste tabeller viser også tabell 14 strekkraft ved brudd, og arealet der bruddet oppsto. Tøyning ved brudd er også inkludert, selv om verdiene er noe usikre.

Tabell 14 Verdier for strekkfasthet for prøvestykkene som gjennomgikk fryse-/tinesykluser

C: Fryse/tine						
Prøve nr.	Areal mm ²	Kraft ved brudd N	Strekkfasthet kN/m ²	Tøyning ved brudd mm	Tøyning over innsnevret område %	E-modul ved brudd MPa
2	168	72	431	4,5	6,1	9,5
3	143	47	326	8,6	11,4	3,8
5	156	77	494	9,5	12,6	5,2
7	165	68	411	7,0	9,4	5,8
9	163	58	359	7,2	9,6	5,0
12	159	87	548	9,9	13,2	5,5
14	159	78	493	6,5	8,7	7,5
16	135	62	460	12,8	17,1	3,6
18	165	84	509	13,9	18,6	3,7
19	168	84	499	12,3	16,5	4,0
22	181	91	504	12,9	17,2	3,9
25	158	107	680	9,0	12,1	7,5
27	153	86	563	7,6	10,2	7,4
29	170	121	715	5,3	7,0	13,6
30	160	108	670	6,0	8,0	11,2
31	167	92	555	5,9	7,9	9,4
34	161	144	893	8,0	10,6	11,2

Den laveste strekkfastheten som ble målt for prøvene som gjennomgikk fryse-/tinesykluser viser 326 kN/m² – ikke betydelig lavere sammenlignet med datasettet for de ubehandla prøvene. Gjennomsnittsverdien for prøvene gir strekkfasthet på 535 kN/m² med et standardavvik på 136 kN/m². Høyeste strekkfasthet var, også i dette tilfellet, for prøve 34. Resultatene for prøve 34 viser en strekkfasthet på 893 kN/m². Verdien er høyere enn for tilsvarende ubehandla prøve.

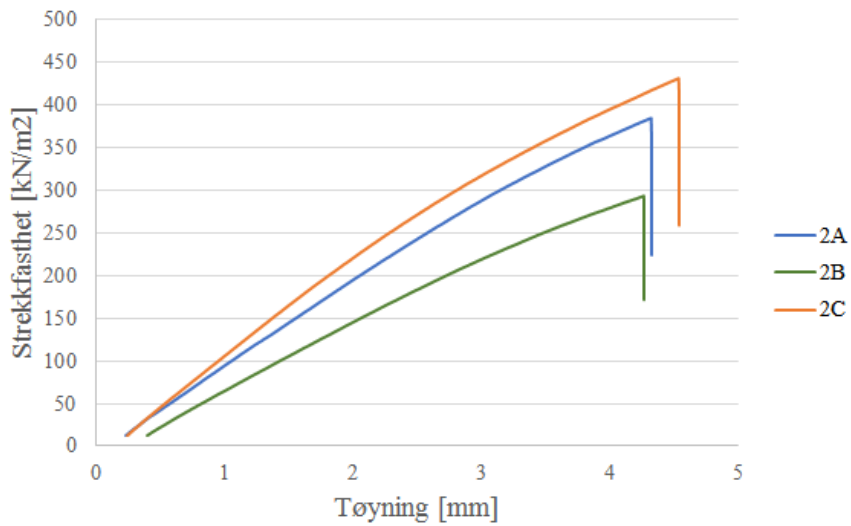
For enklere sammenligning er resultatene for strekk- og trykkfasthet, begge ved brudd, gjengitt i tabell 15.

Tabell 15 Sammenligning av strekk- og trykkfasthet for alle prøvestykkene

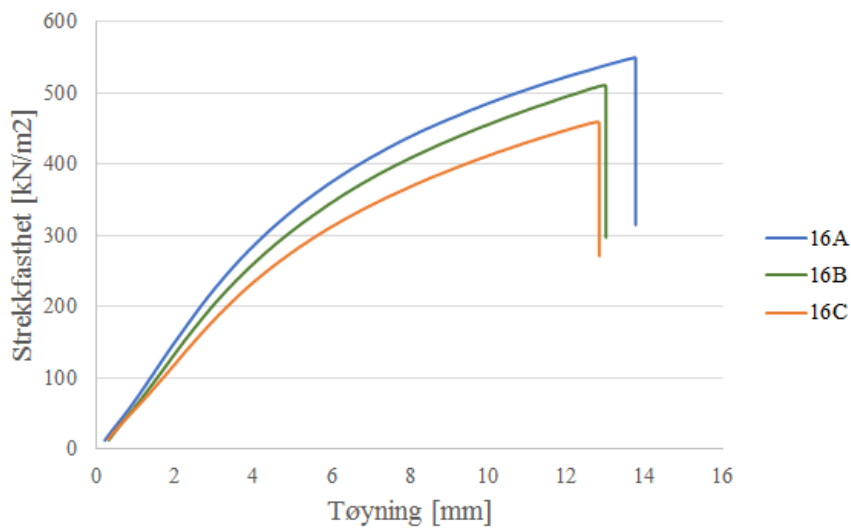
Prøve nr.	A: Ubehandla		B: Nedfrosset		C: Tine/fryse
	Strekkfasthet kN/m ²	Trykkfasthet kN/m ²	Strekkfasthet kN/m ²	Trykkfasthet kN/m ²	Strekkfasthet kN/m ²
2	384	90	294		431
3	484	288	403	86	326
5	562		742		494
7	*	126	537	315	411
9	666		407		359
12	491		390		548
14	559				493
16	550		511		460
17	*	240	*	152	*
18	549	268		193	509
19	598	187			499
20	*				*
21	*				*
22	541				504
25	493	433			680
27	510				563
29	779	430		478	715
30	709	477	505	512	670
31	520		608		555
34	854				893

*Resultater mangler da uforutsette hendelser førte til at testene ikke ble gjennomført.

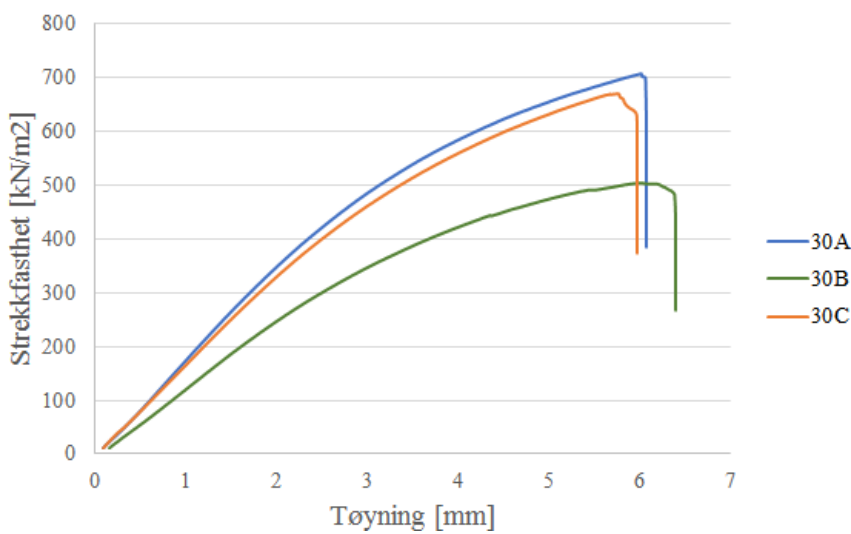
Påfølgende grafer viser spenning-tøyningsdiagrammer for måling av strekkfasthet. Det er valgt å gjengi et utvalg av grafene basert på oppnådde resultater. I hver graf er diagram for ubehandla prøve, prøve gjennomgått fryse-/tinesykluser og prøver testet i frossen tilstand inkludert. Grafene skilles tydelig fra hverandre med forklaringssymbol. For avklaring indikerer A ubehandla prøve, B gjennomfrossen prøve og C prøver som har gjennomgått fryse-/tinesykluser. Samme informasjon som framkommer av grafene finnes i tabell 12,13 og 14.



Figur 63 Strekkfasthet prøve 2A, 2B og 2C



Figur 64 Strekkfasthet prøve 16A, 16B og 16C



Figur 65 Strekkfasthet prøve 30A, 30B og 30C

6.7 Diskusjon

6.7.1 Trykkfasthet

Det ble ikke gjennomført tester for trykkfasthet på PU-skum som gjennomgikk fryse-/tinesykluser. Materialets gode isolasjonsevne ville gjort det meget tidkrevende å gjennomføre et vesentlig antall sykluser med 100x100 mm, kubiske prøvestykker. Totalt ble det gjennomført 15 tester på materialets trykkfasthet, der seks av testene ble gjennomført på prøver i frossen tilstand. Det ble valgt å ikke legge prøvene i vannbad før de ble lagt i fryseren. Begrunnelsen baseres på at forholdene i virkeligheten vil hovedsakelig være *kalde*, og ikke våte. De lukka cellene, i kombinasjon med den beskyttende hinnen rundt overflaten, vil i tillegg hindre store mengder vann i å trenge inn i skummet. God drenering i grøfta vil også bidra til at forholdene ikke blir betydelig våte.

Prøvene for trykkfasthet ble testet i retningen normalt på røret – i den retningen skummet tenkes å fordele trykkrefter i realiteten. Retningen ble altså valgt på grunnlag av de kreftene skummet vil utsettes for i virkeligheten. Retningen er vist på figur 66.

Resultatene fra tabell 9, ubehandla skum, viser stor spredning i resultatene – fra 90 kN/m² til 477kN/m². Resultatene kan synes å ha stor sammenheng med prøvenes densitet da de tre prøvene med høyeste trykkfasthet (>400 kN/m²) har tilnærmet 30% høyere densitet kontra prøvene med trykkfasthet i området 100-300 kN/m².



Figur 66 Retning for testing av trykkfasthet

Prøve 2A viser laveste verdi for trykkfasthet. Prøven ble hentet fra skum påført med lav temperatur på komponentene, noe som fører til en ufullstendig reaksjon i utviklingen av ferdig skum. Materialeegenskapene vil endres som et resultat av den ufullstendige reaksjonen, og det er trolig lav temperatur ved påføring som er årsak til den lave verdien for trykkfasthet.

Sett bort fra resultatene fra prøve 2A, har prøve 7A og 19A lavest trykkfasthet (<200 kN/m²), og også laveste densitet. Den samme trenden er visende for prøvestykkene som har vært frosset ned. Her gir prøve 3B lavest verdi på 86 kN/m². Som for prøve 2A er også prøve 3B hentet fra skum påført med lav temperatur, og årsaken til den lave trykkfastheten er sannsynlig den samme.

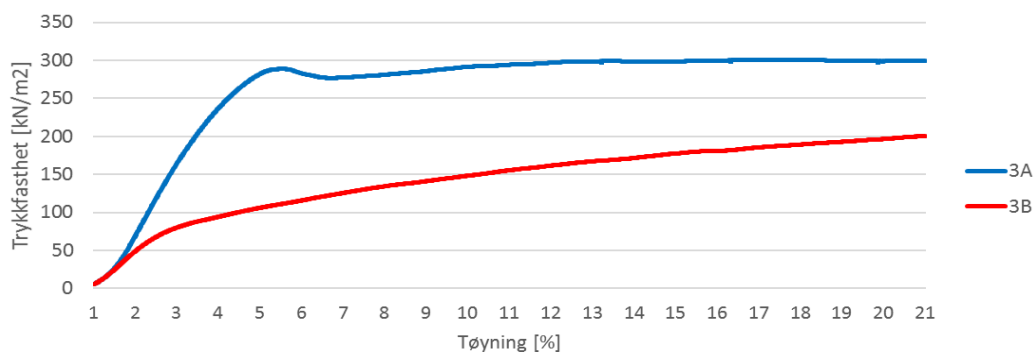
E-modulen er stigende for økende densitet. For prøvene med størst densitet er cellene små og materialet fremstår visuelt som stivere sammenlignet med prøvestykkene med lavere densitet. E-modulen bekrefter observasjonen.

Grafene på figur 54-59 viser et utvalg av spenning-tøyningsdiagrammer for noen av prøvene. Grafene viser en trend for prøve 3 og 7, 17 og 18 samt 29 og 30. Felles for prøvene med trend i spenning-tøyningsdiagrammene er cellestrukturen. På figur 60-62 er de aktuelle prøvene satt

opp mot hverandre. Her vises en tydelig variasjon hva gjelder synlige celler, og ellers visuelle ulikheter som farge på materialet. Prøve 3 og 7 består av godt synlige celler og fremstår som et mye mer porøst materiale sammenlignet med 17-18 og 29-30. Observasjonen gjenspeiles også i grafene. Nødvendig kraft for å fremprovosere brudd i materialet på prøve 3 og 7 er mye lavere sammenlignet med 29-30. Laborarietekniker Steinar Seehuus begrunnet situasjonen med at det er de store cellene i materialets overflate som kollapser først, og at store celler ikke er like motstandsdyktige som mindre, finere celler.

Stigningstallet til kurvene forteller om hvor stivt materialet er. En brattere kurve indikerer at større kraft er nødvendig for å presse materialet sammen. For prøvestykkene med høy densitet og små celler kreves større kraft for å skape en deformasjon i materialet. For prøvestykkene med lavere densitet og godt synlig cellestruktur er ikke samme kraft nødvendig for å deformere prøvestykket, og stigningstallet er derfor lavere.

Hendelsesforløpet fram til prøvestykkene går til brudd er nokså likt for samtlige prøver. På grunnlag av dette diskuteres bare hendelsesforløpet for prøve 3A og 3B detaljert her. Spenning-tøyningsdiagrammet for prøve 3A og 3B er gjengitt på figur 67. For resterende prøver er spenning-tøyningsdiagrammer gjengitt i vedlegg 5.



Figur 67 Spenning-tøyningsdiagrammet for prøve 3A og 3B

Prøve 3A har en lineær graf fram til ca. 4 % i tøyning. Det tilsvarer 4 mm. Fra flytgrensen og fram til materialet går til brudd deformeres prøvestykket ytterligere ca. 1,5 mm. Bruddpunktet nås etter 4,5 mm tøyning i tidspunktet prøvestykket er under en påkjenning på 288 kN/m². Etter bruddpunktet er nådd begynner grafen å stige ytterligere. Laborarietekniker Steinar Seehuus kunne forklare at det skyldes en *sekundær materialeegenskap*. Etter at det første bruddet er nådd, er det "det ytterste sjiktet" av materialet som går til brudd og materialet vil til en viss grad være komprimert. Ved videre lastpåkjenning vil den sekundære materialeegenskapen gjøre seg gjeldende i form av at materialet tåler ytterligere påkjenning siden det fortsatt er intakt cellestruktur i skummet.

Prøve 3B når flytgrensen ved ca. 2,5 mm deformasjon og går over til plastisk deformasjon. Det karakteristiske bruddpunktet er ikke like synlig i grafen for 3B. Årsaken er mest sannsynlig at prøvestykket ikke "gir etter" på samme måte som 3A. Overgangen mellom elastisk og plastisk deformasjon omtales likevel her som bruddpunktet, fordi materialet endres i den grad at det er den sekundære materialeegenskapen som gjør seg gjeldende etter ca. 3 mm deformasjon.

Det er stor variasjon mellom 3A og 3B. Variasjonen er også gjeldende for prøve 7A og 7B. Variasjonen kan mest sannsynlig ikke sies å ha sammenheng mellom frossen og ubehandla tilstand da laveste verdi for begge grafene varierer. For prøve 3 er det frossen tilstand som gir laveste trykkfasthet – for prøve 7 er laveste trykkfasthet målt for den ubehandla prøven. Felles for prøvene som har stor variasjon i trykkfasthet mellom frossen og ubehandla prøve er at skummet prøvene er hentet fra er påført med lav temperatur på komponentene. Det kan derfor tenkes at det er variasjoner innad i området prøvene er hentet fra, og at det er en slik variasjon som gjør seg synlig i ulikheten i materialets trykkfasthet.

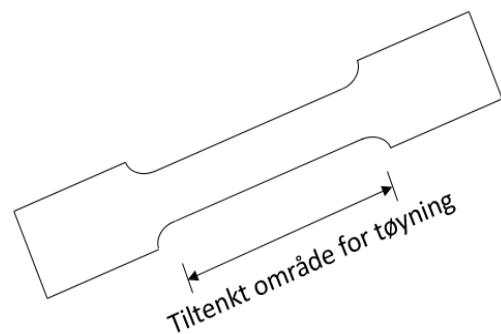
Det har ikke lyktes å finne en sammenheng mellom resultatene fra prøvene testet i frossen tilstand og prøvene testet uten påkjenning på forhånd. I noen tilfeller tåler de nedfrosne prøvene større lastpåkjenning før de går til brudd sammenlignet med de ubehandla prøvene. I andre tilfeller er situasjonen omvendt. Verdiene Svalesen (2015) oppnådde som resultater ligger i området rundt 290 kN/m^2 , for skum med densitet på ca. 45 kg/m^3 . Til sammenligning ligger verdiene for tilsvarende densitet lavere for trykkfasthet i denne oppgaven. Prøvene med høyere densitet ($>45 \text{ kg/m}^3$) har en strekkfasthet i området $400\text{-}500 \text{ kN/m}^2$. Verdiene er tilnærmet 1,7 ganger større sammenlignet med resultatene til Svalesen (2015), og uavhengig av om prøvene er utsatt for påkjenninger på forhånd. Ut fra resultatene kan det derfor synes å ha liten betydning om skummet er påkjent av belastninger i form av frossen tilstand eller fryse-/tinesykluser, men at resultatene heller er avhengig av densiteten til materialet.

6.7.2 Strekkfasthet

I utgangspunktet skulle det gjennomføres 50 tester på materialets strekkfasthet. 10 av testene ble gjennomført på prøver i frossen tilstand – 20 på prøver som tidligere gjennomgikk fryse-/tinesykluser. Resterende prøver ble gjennomført på ubehandla materiale. Syv av totalt 50 prøvestykker ble ikke testet grunnet ulike årsaker. Noen av prøvene hadde enten store hulrom eller lagdelinger som ville opptrådd som svakhetssoner. Noen få prøver tok dessuten skade ved utskjæring. Så fremt prøvene hadde blitt inkludert i forsøksresultatene ville resultatene gitt urealistiske dårlige verdier.

For gjennomføring ble ti av prøvene lagt på frys i forkant av testing. Prøvene ble formskjært og lagt direkte i fryseren. Som for prøvene benyttet i forsøk for trykkfasthet ble heller ikke prøvene for strekkfasthet lagt i vann i forkant av nedfrysing. I tillegg til allerede nevnte grunner skyldes det, spesielt gjeldene for de formskåret stykkene, at tverrsnittet var så lite at det ville absorbere urealistisk mye vann i forhold til hva det vil gjøre i praksis. Dersom prøvene ble lagt i vann ville det gitt en situasjon veldig ulik realiteten – et resultat som ikke var ønskelig.

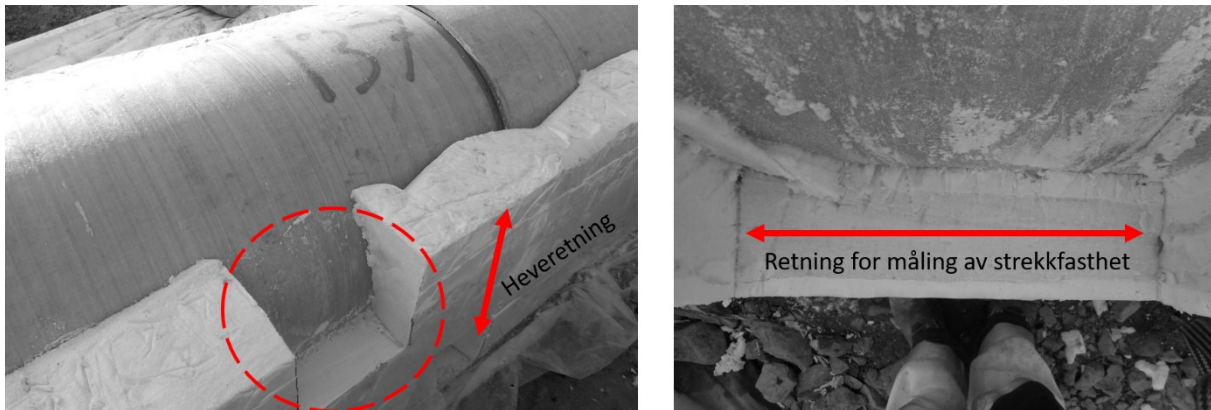
Prøvestykkene ble formskjært med den hensikten at tøyningen skulle komme i det innsnevra området som vist på figur 68. Innsnevringa fra det brede området ble skjært ut med en radius for å unngå skarpe kanter som ville fungert som et svakt punkt. Selv om prøvestykkene ble skåret slik at tøyningen kun skulle skje i det innsnevra området er det rimelig å anta at noe



Figur 68 Tiltenkt område for tøyning

av tøyningen også forekom på det brede feltet. For forenkling er det sett bort fra det i beregningene, og beregnet tøyning over det innsnevra området kan derfor sees på som noe unøyaktig.

Det er parallelt med rørlengden det er kritisk at skummet har kapasitet til å fordele strekkraftene i materialet, og prøvene for strekkfasthet ble derfor testet normalt på heveretningen som skummet hadde ved produksjon. På grunn av skummets cellestruktur er strekkfastheten større parallelt med heveretningen, så målinger normalt på heveretningen vil gi lavere resultater for materialets strekkfasthet.



Figur 69 Retning for testing av trykkfasthet

Tabell 12 viser oppnådde resultater for prøvene som var ubehandla, altså uten noen form for påkjenning. Den laveste strekkfastheten som ble målt var 384 kN/m^2 . Til neste verdi er det en økning på tilnærmet 100 kN/m^2 . Prøven som målte den laveste strekkfastheten hadde relativt lav densitet, $\approx 55 \text{ kg/m}^3$, og i tillegg var det store og synlige celler i skummet. Materialet i seg selv var dessuten porøst og kornete – det kan være en årsak til den lave verdien. De fleste resultatene ligger i området $500\text{-}700 \text{ kN/m}^2$, med unntak av prøvene med høyeste densitet som måler en strekkfasthet mellom $700\text{-}900 \text{ kN/m}^2$.

Svalesen (2015) målte strekkfasthet mellom $500\text{-}600 \text{ kN/m}^2$ for skum med densitet $\approx 45 \text{ kg/m}^3$. Det faktum at verdiene i forsøket ligger høyere har sannsynligvis sammenheng med høyere densitet og ulik cellestruktur. Fra resultatene synes det å være en trend mellom økende strekkfasthet og høyere densitet.

Som en mulig hypotese ble det i forkant av forsøkene antatt at prøvene med høyest densitet og finere cellestruktur skulle tåle mindre strekkpåkjenning. Begrunnelsen for antagelsen var manglende tilstedeværelse av større luftceller, og at materialet ville opptre som mindre elastisk. Det ble derfor antatt at materialet ville gå til brudd ved mindre tøyning, og ved lavere benyttet kraft. Resultatene viser derimot at skum med høyere densitet (se tabell 7 for oversikt over prøvenes densitet) tålte en større lastpåkjenning sammenlignet med lavere densitet.

Hypotesen slo feil og resultatene viser at materialet mest sannsynlig er *sterkere* fordi det inneholder et mindre volum med celler og luft. Prøvene med høyest densitet kan heller ikke sies å tåle betraktelig mindre deformasjon, før det går til brudd, sammenlignet med de andre prøvene. Deformasjonen ved brudd ligger i området $5\text{-}8 \text{ mm}$ for prøvene med høyest densitet.

For prøvene med lavest densitet ligger også deformasjonen i samme område. Større deformasjon, 10-14 mm, er gjeldende for materialene med "middels" densitet, altså for materialet som har en noe synlig cellestruktur men likevel ikke fremstår som et sprøtt og porøst materiale.

At prøvene med noe synlig cellestruktur gir størst deformasjon skyldes trolig at materialet er mer elastisk grunnet cellestrukturen, og at cellene gjør det mulig å deformere materialet ytterligere før det går til brudd. At materialet med lavere densitet ikke har samme egenskapen skyldes sannsynligvis at skummet har mer porøs struktur, at materialet ikke er like elastisk og at cellene ikke er like sterke.

Som for trykkfastheten er det ikke funnet noen sammenheng mellom resultatene for strekkfasthet fra ubehandla prøver og de prøvene som ble testet i frossen tilstand. Resultatene varierer ut fra hva som gir høyeste strekkfasthet, men strekkfasten kan se ut til å ha en sammenheng med densitet. Høyere densitet resulterer i økt strekkfasthet i de fleste tilfellene.

For prøvene som på forhånd gjennomgikk gjentatte fryse-/tinesykluser har det heller ikke lyktes å finne en klar sammenheng mellom oppnådd strekkfasthet. I dette tilfellet synes også strekkfastheten å øke med økt densitet på prøvestykkene. I noen tilfeller er verdiene lavere enn for de ubehandla prøvene – i andre tilfeller høyere. Det som kan sees som et interessant funn er materialets tøyning ved brudd. For prøvene som tidligere har gjennomgått fryse-/tinesykluser er tøyningen ved brudd høyere sammenlignet med tilsvarende verdi for de ubehandla prøvene. Kun i noen få tilfeller er resultatene motsatt. Resultatene kan skyldes at materialet har blitt pådratt en "skade" under påkjenningen, og at cellestrukturen har blitt endret som et resultat av det. Dersom noen av cellene har kollapset under påkjenningen – for eksempel ved at vannet i cellene har ekspandert og knust cellene, er det tenkelig at materialet vil kunne bli mer elastisk siden cellestrukturen ikke lengre er intakt.

Grafene på figur 63-65 viser spenning-tøyningsdiagram for tre vilkårlige prøver. Spenning-tøyningsdiagrammer for resterende prøver er vist i vedlegg 4. Hendelsesforløpet på de tre grafene som er presentert er nokså likt. Fram til 2-3 mm deformasjon er grafene på figurene lineære, og materialet gjennomgår en elastisk deformasjon. Deretter bøyer kurven seg, og materialet deformeres plastisk før det går til brudd. Som det synliggjøres i grafene er det tilsynelatende liten sammenheng mellom strekkfastheten og påkjenningen prøvene har vært utsatt for på forhånd.

Strekkfastheten er, som antatt, høyere enn trykkfastheten. Lavere verdi for trykkfasthet ble tidligere begrunnet med at i strekkforsøk er det selve materialet som går til brudd ved at celleveggene strekkes. Ved trykkforsøk belastes materialet til cellene kollapser – de knekkes som et resultat av påkjenningen de blir utsatt for. Svalesen (2015) fant i sine resultater en strekkstyrke 1,8 ganger trykkstyrken. Resultatene fra de ovenfor beskrevne forsøkene viser at strekkfastheten er 1,6-1,8 ganger trykkstyrken. Verdien er gjeldende for skum med densitet i området 60-80 kg/m³

6.7.3 Mulige usikkerhetsmomenter

Både måling av strekkfasthet og trykkfasthet ble gjennomført i en Instron materialprøvemaskin. Selve prosedyren for utførelse er automatisert, og gjennomføres uten manuell kraft. Dataprogrammet tilknyttet maskinen logger oppnådde resultater for hvert 0,2 sekund – en innstilling som kan endres manuelt etter ønsket nøyaktighet på resultatene. I forsøkene knyttet til oppgaven ble det loggført resultater hvert 0,2 sekund. Det knyttes liten usikkerhet til nøyaktigheten av målingene og resultatene loggført i dataprogrammet i tilknytning til forsøkene.

For strekkfasthet er tøyningen ved brudd basert på forenklingen som tilsier at tøyningen bare skjer i det innsnevra området. I realiteten vil tøyningen gå over hele prøvestykket. Tøyningen over det innsnevra området er derfor en usikker verdi. Som et resultat av usikkerheten ved tøyning, er E-modul også en usikker verdi grunnet at E-modulen inkluderer tøyningen i beregningene.

For måling av strekkfasthet ble tverrsnittsarealet på det innsnevra området skåret ut etter målene 10 x 15 mm. Arealet som ble benyttet til utregning av strekkfasthet ble målt *etter* at bruddet oppsto. Verdien ble målt i begge ender av bruddet, men skal i teorien måles i forkant av strekktesting. Det begrunnes i at prøvestykket deformeres, og at tverrsnittsarealet for bruddet vil være større i forkant av strekktesting. Det opprinnelige arealet er det arealet strekkreftene virker på. For å undersøke i hvor stor grad prøvestykkene ble utsatt for varig deformasjon ble det utført kontrollmålinger av prøvestykkene i lengderetningen. Målingene viser en varig deformasjon i lengderetningen i størrelsesorden 2-3 mm. I tillegg viser resultatene til Svalesen (2015) en varig deformasjon på 1-2 mm. På grunnlag av den lave størrelsesordenen i varig deformasjon i lengderetningen vurderes det slik at deformasjonen har en liten innvirkning på tverrsnittsarealet som ble benyttet til utregning av strekkfastheten. Det gjøres likevel oppmerksom på at målingene foreligger som et lite usikkerhetsmoment i forsøket.

Både for måling av strekkfasthet og trykkfasthet ble prøvene testet i vilkårlig rekkefølge. Vilkaørlig gjennomføøring av testene vil forhindre at mulige feil med testutstyr forplantes i sammenheng med teststykkene. Dersom testene gjennomføres i nummerert rekkefølge, vil mulige feil med testutstyr øke i takt med nummereringen. Usikkerhetsmomentet knyttet til feil med testutstyr ble derfor minimalisert med vilkårlig testrekkefølge, og anses som en liten usikkerhet i forsøkene.

Forsøkene oppsett, både for strekkfasthet og trykkfasthet, betraktes som nøyaktig. Med bakgrunn i nevnte usikkerhetsmomenter knyttes det også liten usikkerhet til selve gjennomføørelsen av forsøkene. Forsøkene i sin helhet betraktes derfor som av god kvalitet.

7. Veileder og testprosedyre for kvalitet i felt

I forbindelse med utvikling av metoden er det utarbeidet en veileder for bruk av PU-skum som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater. Veilederen er utarbeidet i samarbeid med medstudent Stian Løbø Aaker, og gjengitt i vedlegg 6.

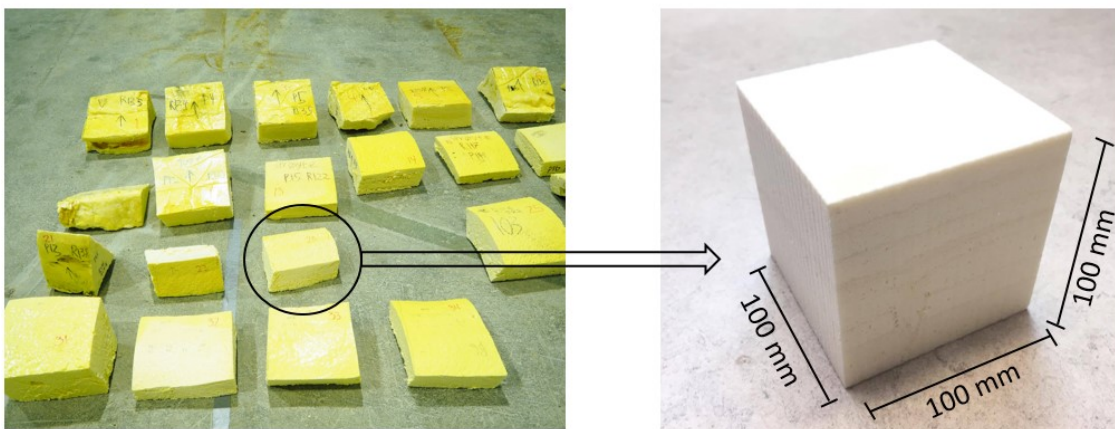
Veilederen omhandler blant annet spesielle bestemmelser ved bruk av PU-skum, beregningsmetoder for nødvendig skumtvversnitt og aktuelle lastpåkjenninger dersom PU-skum blir benyttet. Spesielle hensyn og tiltak for bruk av PU-skum i bend er også inkludert. I tillegg presenteres et oppsett for testprosedyre av PU-skummets kvalitet i felt. Oppsettet baseres på observasjoner, funn og resultater gjort i oppgaven.

For å sikre tilstrekkelig kvalitet på PU-skummet lagt i felt er det nødvendig med undersøkelser av skummet underveis i byggetiden. Som tidligere nevnt er kvalitet betegnelsen på en homogen masse, uten fargeendringer. God kvalitet kjennetegnes også ut fra et materiale uten hulrom og store, synlige celler. Påfølgende kapitler viser prosedyrer for å kartlegge oppnådde resultater innenfor mekaniske egenskaper, densitet og heft. I tillegg er det foreslått en metode for slagtest som enkelt gjennomføres i felt.

Det forutsettes at inkluderte parter er innforstått med de begrensninger som er knyttet til bruk av PU-skum, og hvilke restriksjoner som må imøtekommes for å kunne produsere et skum av god kvalitet. Begrensningene er tidligere gjengitt oppgaven, og det henvises derfor til "2.5 Begrensninger" for opplysning.

7.1 Mekaniske egenskaper

For strekk- og trykkfasthet viser forsøk utført i oppgaven en god korrelasjon mellom materialets densitet og evnen til å motstå lastpåkjenninger. Økende densitet samsvarer med økt strekk- og trykkfasthet. For prøvene med densitet i området $60\text{-}80\text{ kg/m}^3$ indikerer forsøkene at strekkfastheten er 1,6-1,8 ganger trykkstyrken. Resultatene fra forsøkene til Svalesen (2015) viser strekkfasthet 1,8 ganger trykkstyrken – en verdi som støtter funnene gjort i oppgaven. Dersom densitet er en kjent verdi, er det mulig å grovt anslå en verdi for materialets mekaniske egenskaper.



Figur 70 Utforming av prøvestykker for mål av densitet

Materialets densitet måles enkelt ved å skjære ut et prøvestykke fra rørgata etter at PU-skummet er herdet. Prøvestykket skjæres ut større enn målene 100x100x100 mm, slik at det senere kan finskjæres til å passe nøyaktige mål på 100x100x100 mm for testing. Se figur 70. Et eksakt volum gjør beregningene enklere og mer nøyaktige. Vekten måles videre med en digital vekt som kalibreres for hver måling. Kalibrering gjennomføres for å unngå målefeil.

Densitet kan deretter regnes ut fra formelen:

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

Tabell 16 og 17 bygger på resultatene for strekk- og trykkfasthet funnet i forsøkene knyttet til oppgaven. Tabellene er oppdelt etter hvilken type skum som er benyttet – sprøyteskum eller pour-skum. Tabell 16 viser en oversikt over densitet og verdier for strekk- og trykkfasthet oppnådd ved testing av sprøyteskum.

Tabell 16 Oversikt over densitet og gjennomsnittsverdier for strekk- og trykkfasthet: sprøyteskum

Densitet kg/m ³	Strekkfasthet kN/m ²	Trykkfasthet kN/m ²
<55		
51,4	523	
<i>Standardavvik</i>	0	
<i>Gjennomsnitt</i>	523	
60-65		
64,7	536	
60,0	526	
61,9	507	
<i>Standardavvik</i>	12	
<i>Gjennomsnitt</i>	523	
65-70		
66,7	586	433
68,2	747	454
68,2	561	
<i>Standardavvik</i>	82	11
<i>Gjennomsnitt</i>	632	444
>70		
71,9	628	494
76,3	873	
<i>Standardavvik</i>	123	0
<i>Gjennomsnitt</i>	751	494

Tabell 17 gjengir densitet og tilhørende verdier for strekk- og trykkfasthet målt i tester utført på pour-skum.

Tabell 17 Oversikt over densitet og gjennomsnittsverdier for strekk- og trykkfasthet: pour-skum

Densitet kg/m ³	Strekkfasthet kN/m ²	Trykkfasthet kN/m ²
<55		
50,5	404	187
50,8	529	230
52,6	548	187
54,8	476	
<i>Standardavvik</i>	56	20
<i>Gjennomsnitt</i>	489	202
55-60		
56,0	369	90
55,6	600	
55,1	474	220
55,8	477	
<i>Standardavvik</i>	81	65
<i>Gjennomsnitt</i>	480	155

Verdiene er en gjennomsnittsverdi funnet for alle prøvene som ble testet. Standardavviket er gitt i tabellene og varierer fra 12-123 kN/m². Standardavviket viser en relativ stor spredning, noe det må tas høyde for. Spredningen skyldes de store variasjonen i kvaliteten på skummet som ble testet for strekk- og trykkfasthet.

For prøvene med densitet >60 kg/m³ viser samtlige forsøk verdier for strekkfasthet over 500 kN/m². Ved høy densitet er det derfor stor sannsynlighet for at strekkfastheten til materialet også overstiger 500 kN/m².

For et godt trent øye er det tilnærmet tilstrekkelig med en visuell kontroll for å kunne vurdere de mekaniske egenskapene. Et homogent, tett materiale med kremaktig farge og uten klar, synlig cellestruktur vil trolig ha en strekkfasthet i overkant av 500 kN/m³. Utsagnet baseres på resultatene tilknyttet oppgaven, og visuelle observasjoner gjort underveis i gjennomføringen av testene.

Ved utskjæring av prøvestykker er det i tillegg en god anledning til å undersøke materialet visuelt. Fargeforandringer, inhomogen porestruktur og synlige variasjoner innad i materialet er faktorer som kan kontrolleres.

7.2 Slagtest

En slagtest gir god indikasjon på elastisiteten, eller sprøheten, til materialet. Elastisiteten og sprøheten er egenskaper som beskriver materialets evne til å motstå punktlast, og materialets evne til å beskytte røret mot ytre påkjenninger i byggefasen. I gjennomføring av forsøket ble følgende utstyr benyttet:

Tabell 18 Utstyr benyttet i slagtest

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 baseres på utstyr som normalt sett er tilgjengelig på byggeplass. Det er benyttet en bolt for å etterligne den samme effekten som en spiss stein vil ha i virkeligheten.

Røret plasseres på skumoverflaten. I forsøket er et prøvestykke med målene 100x100x100 mm benyttet. Røret holdes vertikalt når bolten slippes i fritt fall gjennom røret. Gjennomføringen er vist på figur 71, og demonstrerer hvor enkelt forsøket kan utføres i felt.



Figur 71 Gjennomføring av slagtest

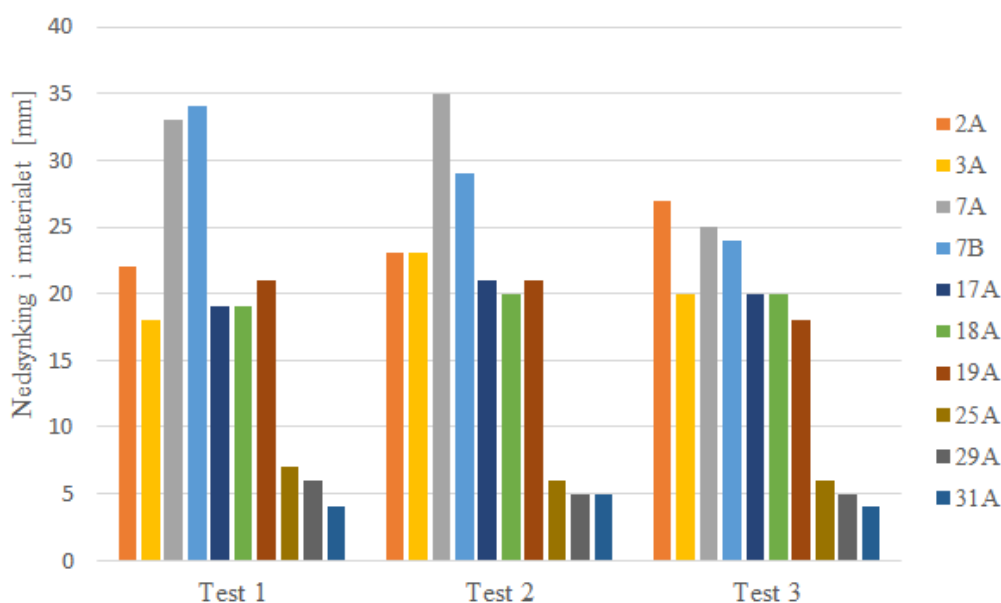
Bolten fjernes, og høyden på nedsunket område måles nøyaktig.

Forsøk gjort på et tilfeldig utvalg prøvestykker med synlig varierende cellestruktur viser variasjonene i materialets sprøhet. Forsøkene ble gjennomført både på prøver av pour-skum og sprøyteskum. Resultatene er vist i tabell 19.

Tabell 19 Resultater fra slagtest

Prøve nr.	Densitet kg/m ³	Test 1 mm	Test 2 mm	Test 3 mm	Gjennomsnitt mm
2A	56	22	23	27	24
3A	51	18	23	20	20
7A	55	31	29	26	29
7B	55	34	31	24	29
17A	54	19	21	20	20
18A	51	19	20	20	20
19A	53	21	21	18	20
25A	67	7	6	6	6
29A	68	6	5	5	5
31A	68	4	5	4	4

Figur 72 viser variasjonen i de tre forsøkene som ble gjennomført. Standardavviket for forsøkene ligger i området 0-3 mm.



Figur 72 Variasjoner i slagtest

I forsøkene ble det gjennomført tre slagtester på hvert av prøvestykkene. Resultatene viser små variasjoner for sprøhet innad i prøvestykket, men store variasjoner for prøvene med ulik cellestruktur. For avklaring er nr. 25-31 prøver laget av sprøyteskum. Resterende prøver er pour-skum. Nr. 17-19 er pour-skum av "god" kvalitet der cellestrukturen er jevnt fordelt og materialet har en fin, homogen farge.

Basert på vurderinger og oppnådde resultater anbefales det for pour-skum at verdien for nedsunket høyde ikke overstiger 20 mm. Verdier utover 20 mm indikerer et materiale som ikke innehar ønsket mekaniske egenskaper.

Sprøyteskummet viser i mye større grad elastiske egenskaper. De elastiske egenskapene skyldes den høye densiteten til materialet. På grunnlag av oppnådde resultater anbefales det at verdien for nedsunket høyde ikke overstiger 5 mm.

7.3 Heft

En av PU-skummets hensikter er å sørge for fastholdning mellom muffa og røret. Dersom heften ikke er tilstede mellom røroverflaten og skummet, vil røret kunne bevege seg på innsiden av skummet og, i verste fall, kan røret gli ut av muffa. Hvor stor heftkapasitet som er nødvendig avhenger av hva prosjektet og rørgata er dimensjonert for. Det legges likevel frem et forslag for å beregne oppnådd heft, uavhengig av gitte krav.

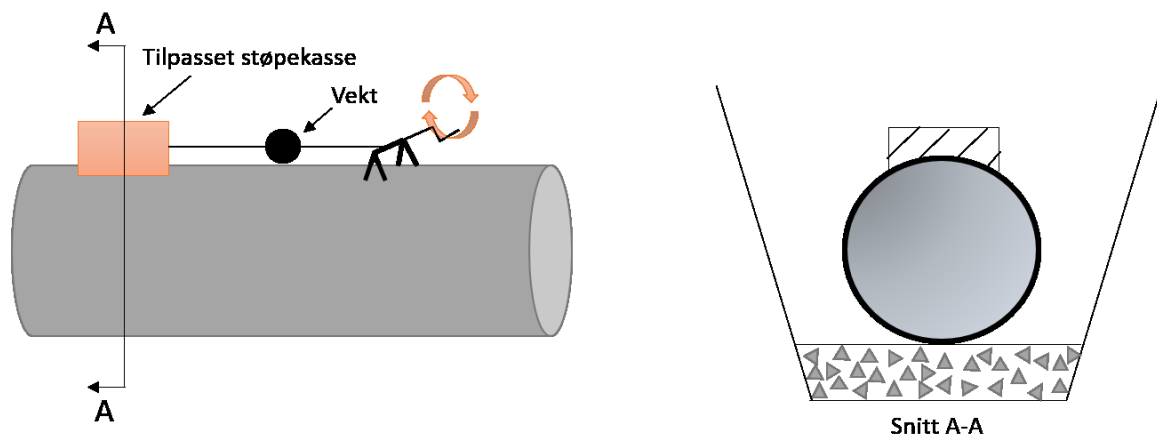
I felt vil det være mest gunstig å gjennomføre kontroll av heft parallelt som arbeidet pågår. Med dette menes at tester bør gjennomføres på samme plass og under samme forhold som resten av skummet som produseres. I tilfeller der det påføres skum på et prøveområde på et rør oppe av grøfta, vil det være under andre forhold og heften oppnådd på rørgata trenger ikke samsvare med heften på prøveområdet.

For gjennomføring av kontrollering bør det innføres en standardisert metode. Aaker (2017) benyttet i sin masteroppgave en testrigg for måling av heft. Metoden er egnet i felt, og gjengis kort her. For videre forklaring av metoden henvises det til arbeidet som er utført av Aaker (2017).

Utstyr:

- Vekt
- Sveiveanordning med mulighet for fastholding til røret
- Støpekasse med gitt areal og tilpasning til rørets diameter

Prinsipielt oppsett:



Figur 73 Prinsipiell figur av heftforsøk

Figur 73 viser prinsippet bak løsningen. Sveiveanordningen festes til røret og støpekassen fylles med PU-skum. Støpekassen er åpen mot røroverflaten med et gitt areal, A. Etter endt herdetid påføres en aksial kraft, F, ved å rotere sveiveanordningen og vekten viser benyttet kraft. Heftkapasiteten kan 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 heft er innenfor gitte krav og i samsvar med hva rørgata er dimensjonert for.

Størrelsen på målt heftkapasitet påvirkes i stor grad av temperaturen på røroverflaten ved påføring av skummet, slik at lavere temperaturer gir lavere heftkapasitet. Hvor stor heftkapasiteten må være vil variere ut ifra område på rørgata (rettstrekke eller bend). På flate partier og partier med lite trykk fungerer skummet bare som en mekanisk beskyttelse av røret mot skarpe steiner. I brattere helninger og ved bend må prosjekteringa av rørgata i hvert enkelt tilfelle angi hva som er minstekrav for målt heftkapasitet for at røret skal ligge stabilt.

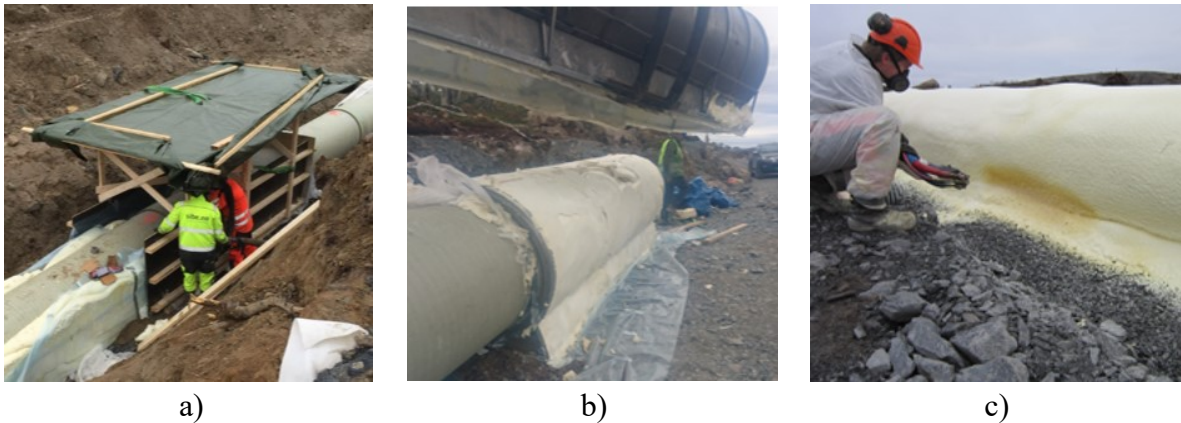
8. Gjennomføring av neste fullskalaprojekt

8.1 Hvorfor er det nødvendig å gjennomføre ytterligere fullskalaprojekter?

Per dags dato er metoden med PU-skum som erstatter for pukk og knuste masser benyttet i ett fullskalaprojekt – Lille Måsevann. Her ble metoden utført i praksis, og de utfordringer som knyttet til utførelse ble avdekket for første gang.

Det første fullskalaprojektet la grunnlaget for videre utvikling og forskning ved NTNU. Testene som er blitt gjennomført viser gode resultater både på kvalitet i form av vannabsorpsjon og mekaniske egenskaper for skum lagt i felt. Resultatene viser at det er produsert skum med tilstrekkelige mekaniske egenskaper i felt, og at metoden har et godt potensiale.

For videre utvikling av metoden, og for å avdekke dens fulle potensiale, er det nødvendig å gjennomføre flere fullskalaprojekt. Det foreligger nå mer erfaring, kunnskap og forskning bak metoden for å kunne gjennomføre et arbeidet på en mer effektiv, kvalitetskontrollert og gunstig måte.



Figur 74 Gjennomførte metoder a) Åpen forskaling b) Lukket forskaling c) Direkte påføring

Som vist på figur 74 er skummet hittil påført røret på forskjellige metoder basert på ulike prinsipper. Utprøving og testing var nødvendig for å avdekke uforutsette utfordringer, og for å opparbeide kunnskap om bruk av metoden i felt. I fremtiden må det standardiseres en industrialisert prosess for påføring. Metoden må være praktisk mulig å gjennomføre i felt, samtidig som tidligere avdekte utfordringer tas høyde for.

8.2 Utfordringer som må tas høyde for i neste prosjekt

Som nevnt tidligere stilles det begrensninger ved bruk av PU-skum. Begrensningene baseres i stor grad på funn gjort i gjennomføringen av prosjektet ved Lille Måsevann. I tillegg viser forsøk gjennomført av Aaker (2017) parallelt med utarbeidelse av oppgaven at det er nødvendig med ytterligere tiltak for å oppnå tilstrekkelig heftkapasitet mellom PU-skum og rør.

8.2.1 Nedbør og fukt på røroverflaten

I det tidsrommet PU-skummets komponenter reagerer med hverandre er det kritisk at komponentene ikke utsettes for vann. Det gjelder både vann i form av nedbør, og fukt som oppstår som et resultat av kondens på røroverflaten.

Ved påføring med bruk av forskalingsløsninger kan røroverflaten tørkes av, og komponentene beskyttes for nedbør ved hjelp av en skjermende "takløsning". Ved påføring direkte på rør er det mer omfattende å skjerme for nedbør.

Kondens på røroverflaten oppstår gjerne ved solnedgang, på natten og i morgentimene når røroverflaten har blitt avkjølt og luften varmes opp. Kondens er et fenomen som det må tas hensyn til, spesielt ved påbegynnende arbeid hver dag. Kondensen vil også kunne legge seg på skumoverflaten og være vanskelig å fjerne ved påføring av nye lag med skum.. Derfor er det spesielt viktig å ta hensyn til kondens når det benyttes sprøyteskum og det oppstår fukt mellom lagene. Det er mest gunstig å ferdigstille hele tykkelsen på skumtvversnittet for en gitt lengde før arbeidsdagen er over.

8.2.2 Heft og temperatur

Heft i sjiktet mellom PU-skum og røroverflate er kritisk i bend. For rettstrekker er ikke heftkapasiteten betydelig i samme grad, og det er heller ikke nødvendig å gjennomføre ekstra tiltak i slike tilfeller.

Ved Lille Måsevann ble det utført tiltak for å oppnå heft i området der rørgata inneholder bend. Røroverflaten ble varmet opp for å unngå dannelse av polyurea. I samtale med skumleverandør Covestro (Jeannette Sund, Research and Development, 28.08.16) ble det informert om at nødvendig temperatur for å unngå dannelse av stoffet er 15 °C, og at røroverflaten med fordel kunne holde en temperatur høyere enn den nevnte verdien.

Rørtemperaturen på 15 °C er et nøkkeltall i produksjonen av PU-skum. Temperaturen gjør at stoffet polyurea ikke utvikles, og at skummet derfor skal kunne hefte mot røroverflaten. Forsøk gjennomført av Aaker (2017) viser derimot at temperaturen på 15 °C ikke er tilstrekkelig for å oppnå den heftkapasiteten som kreves i formål knyttet til trykkpåkjennte rørgater. Ved 15 °C vil skummet hefte mot røroverflaten, men resultatene fra gjennomførte forsøk viser at heftkapasiteten ikke er tilstrekkelig.

Basert på gjennomførte forsøk og oppnådde resultater, anbefales det at røroverflaten varmes opp til 22 °C. Merk at nødvendig heftkapasitet vil variere fra prosjekt til prosjekt. For utdypende forklaring henvises det til arbeidet utført av Aaker (2017).

8.2.3 Andre faktorer

Ved Lille Måsevann ble det gjennomført mange justeringer på komponentenes temperatur, samt temperaturen på slangen for påføring. Komponentene er oljebaserte produkter, og lav temperatur vil gi en økning i viskositeten. Økt viskositet gjør at komponentene får vanskeligheter med å blande seg i munnstykket på sprøytepipetten, og resultatet er skum av uønsket kvalitet.

For høy temperatur er heller ikke ønskelig. Høye temperaturer på komponentene medfører en raskere ekspansjon, og det er fare for at skummet utvikler store hulrom i strukturen. Ved påføring av pour-skum anbefales følgende temperaturer:

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

Ved bruk av sprøyteskum er følgende verdier anbefalt:

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

Temperaturene baseres på erfaringer gjort ved Lille Måsevann og resultater oppnådd i forsøk utført ved NTNU i tilknytning til oppgaven.

For å unngå hulrom i skumtværsnittet er det også andre hensyn som må ivaretas. Hulrom skyldes gjerne for høy varmeutvikling i skummet ved produksjon. Varmeutviklingen motvirkes ved å påføre et mindre volum med skum, og ved å la skummet kjøles ned før ytterligere påføring.

Røret er i større grad utsatt for oppdrift når PU-skum benyttes som erstatter for pukk og knuste masser. Prosjektet ved Lille Måsevann ble prosjektert med relativt stor overdekning over røret, og oppdriften ble ikke betraktet som en utfordring. Ved gjennomføring av andre fullskalaprojekter må det gjennomføres nødvendige beregninger for oppdrift. Beregningene må baseres på benyttet skumtværsnitt (volumandel med skum), rørets vekt (både tomt og vannfylt) og vekten til de stedlige massene som benyttes ved tilbakefylling.

8.3 Forslag til gjennomføringsmetode

I påfølgende punkter omtales faktorer som må tas hensyn til i gjennomføringen av neste fullskalaprojekt. Punktene baseres på erfaringer gjort ved Lille Måsevann og praktiske løsninger basert på tidligere utfordringer. Punktene inkluderer ikke gjennomføringsmetode for hele prosjektet – kun spesielle tiltak som er nødvendig for gjennomføringen dersom det benyttes PU-skum som omfyllingsmasse.

Planlegging og prosjektering

Prosjektet bør planlegges og prosjekteres på en slik måte at påføring av skum inntreffer på den tiden av året med minst nedbør. Minst nedbør vil gjerne være i løpet av sommermånedene. Prosjektstart bør legges i forkant av sommermånedene, gjerne april-mai. På denne måten forskyves ikke oppstart med påføring av skum utover sensommeren.

I planleggingen av prosjektet bør det også legges inn sannsynlighet for lengre nedbørsperioder, og eventuelle løsninger på situasjonen. En gunstig og effektiv løsning som er lett å ha for hånd er enkle telt som kan slås opp dersom nedbør vedvarer over lengre perioder. På denne måten kan kommersielle aktører sikre en god fremdrift i prosjektet, til tross for nedbør.

Utforming av grøft

Grøftebunnen utformes på en måte som medfører at røret ligger stabilt, uten fare for setninger og deformasjoner. I tillegg utformes drencslaget i en høyde som medfører at underkant av skumtvverrsnittet står tørt.

Vannet må også dreneres ut av grøfta i byggeperioden. Tiltaket gjennomføres for gode arbeidsforhold.

Påføring av PU-skum

Den mest tidseffektive metoden for påføring av skum er tilsynelatende påføring direkte på rør. Påføring direkte på rør er dessuten metoden som har resultert i skum med best oppnådde mekaniske egenskaper. For gjennomføring av neste fullskalaprojekt anbefales derfor bruk av sprøyteskum, og påføring direkte på rør. Metoden medfører lav oppbinding av maskineri, da det kun stilles krav til to personer for selve utførelsen.

Påføringen av skummet må foregå i tidsrom uten nedbør. Dersom nedbørsperioden vedvarer anbefales midlertidige telt for skjerming.

Ved påføring av skummet tas det høyde for varmeutviklingen. Det gjøres ved å påføre lag i tykkelse 20-30 mm, som deretter avkjøles. For god fremdrift påføres skummet på en lengre lengde av røret i samme "syklus". Her er det lengden på slangen for påføring som setter begrensninger. Ved gjennomføring i sykluser åpnes det for at arbeidet foregår kontinuerlig. Når et større område ferdigstilles med et skumtvverrsnitt med tykkelse 20-30 mm, vil den påstartete enden allerede ha avkjølt seg og arbeidet kan fortsette.

Bend og heft

I bend er det viktig at røroverflaten varmes opp. Det kan for eksempel gjøres ved å bygge et tett telt over selve bendet, og deretter varme opp røroverflaten med varmluft. En annen løsning vil være å benytte tinematter/varmetepper rundt rørperiferien. Samme utstyr blir benyttet til opptining av for eksempel rundballer, og de leveres med termostater for enkelt å kunne overvåke temperaturen.

Logistikk

Logistikken i et prosjekt der PU-skum blir benyttet er viktig. Spesielt er det viktig i forhold til arbeidsfordeling og planlegging av fremdriften i prosjektet. Påføring av PU-skummet begrenses til nedbørsfrie perioder, og det er viktig med en viss fleksibilitet i prosjektet. Gitt at de mest kritiske områdene på rørgata (bend) blir prioritert i perioder der været er gunstig, vil ikke fremdriften i prosjektet være like væravhengig sammenlignet med at påføringen foregår fra "A til B".

Logistikken er også viktig for utgraving av grøft. Dersom hele grøfta står åpen i lengre perioder vil det kunne resultere i at grøfteveggene raser sammen ved intensivt regnvær, og at massene i grøfta blir utfordrende å jobbe med. Mest hensiktsmessige løsning er å grave grøfta i samhandling med rørleggingen. Rørleggingen kan gjerne utføres parallelt med påføringen av skum, slik at påføringen av skum skjer i kort tidsrom etter at røret er lagt i grøfta.

Inkluderte parter

PU-skum som omfyllingsmasse er en nyutviklet metode. I gjennomføringen av neste prosjekt er det viktig at alle inkluderte parter har en felles forståelse for prosessen. Dette inkluderer både entreprenør og byggherre/prosjekteier.

Personen, eller personene, ansvarlig for påføring av skummet bør ha relevant erfaring, samt være kompetente til å utføre arbeidet på en tilstrekkelig måte. Påføring av PU-skum med sprøyteskum er et fysisk krevende arbeid, og for å sikre god fremdrift bør personen ansvarlig være i god fysisk form.

9. Konklusjon

9.1 Gjennomføring av pilotprosjekt

Gjennomføringen av prosjektet ved Lille Måsevann var nødvendig for videreutviklingen av metoden. I løpet av prosjektet ble det belyst utfordringer knyttet til de ulike metodene for påføring som ble utført – utfordringer som på forhånd ikke var gjort rede for.

Totalt ble det gjennomført tre metoder for påføring:

- Påføring med åpen forskaling
- Påføring med lukket forskaling
- Påføring direkte på røret

Metodene hadde ulike utfordringer, og utfordringene ble håndtert etter hvert som de oppstod. Av metodene for påføring som ble gjennomført ved Lille Måsevann var påføring direkte på røret metoden som ga best resultat. Skummet som ble produsert var uten hulrom, og cellestrukturen var nesten ikke synlig. Fargen var homogen gjennom hele tverrsnittet, og grunnet tiltakene som ble gjort, heftet skummet godt mot røroverflaten. Påføring direkte på røret er dessuten den eneste metoden som etterlater skumoverflaten med lukkede celler som er en bidragsyter til å forhindre vanninntrenging.

Gjennomføringen av pilotprosjektet var avgjørende for utvikling av metoden, og la grunnlaget for videre forskning. PU-skum var tidligere kun fremstilt på laboratorium, og det var nødvendig for metoden i sin helhet å undersøke om det var mulig å produsere skum i felt med samme mekaniske egenskaper som oppnådd på laboratorium.

9.2 Kvalitetsforsøk

Fra prosjektet ved Lille Måsevann ble det skåret ut prøvestykker fra rørgata. Prøvestykkene ble hentet fra ulike steder i traseen, og ble skåret ut for hver gang det ble gjort endringer med påføringsmetode, samt endringer i blandeforhold eller temperatur på skummets komponenter. Prøvestykkene ble benyttet i gjennomføringen av kvalitetsforsøkene.

9.2.1 Vannabsorpsjon

Det gjennomførte forsøket viser at materialet absorberer vann i ulik grad. Prøvestykkene med lavest densitet absorberte en større mengde vann sammenlignet med prøvestykker med høyere densitet. Resultatene varierer fra 4,5 vol% for laveste densitet på 51 kg/m³, til 1,8 vol% for densitet på 78 kg/m³. Vannabsorpsjonen synes å være avhengig av materialets densitet og cellestruktur. Resultatene som er oppnådd vurderes som pålitelig på grunnlag av gjennomføringen og forsøkets oppsett.

9.2.2 Mekaniske egenskaper

Det var ønskelig å gjennomføre tester på de mekaniske egenskapene til skummet som ble produsert i felt. Tester som avdekker materialets strekk- og trykkfasthet indikerer om materialet produsert i felt innehar de samme egenskapene som materialet produsert på laboratorium.

For å undersøke om skummet påvirkes av sesongvariasjoner, ble det i forkant av testene gjennomført gjentatte fryse-/tinesykluser på materialet. I tillegg ble et utvalg av prøvene testet i frossen tilstand.

Forsøkene ble utført ved Materialteknisk laboratorium ved NTNU, der strekk- og trykkfastheten ble målt i en Instron materialprøvemaskin. Resultatene viser tilsynelatende ingen sammenheng mellom prøvene som ble utsatt for gjentatte fryse-/tinesykluser på forhånd, ei heller for prøvene som ble testet i frossen tilstand. Resultatene kan sies å være upåvirket av de ytre påkjenningene.

Det kan se ut som resultatene for strekk- og trykkfasthet har sammenheng med densitet og type skum som er benyttet. For pour-skum ble de høyeste verdiene for strekkfasthet målt til 500-600 kN/m², og trykkfastheten ca. 200 kN/m². For sprøyteskum ble strekkfastheten målt opp mot 800 kN/m², og trykkfastheten i området rundt 500 kN/m². Materialets evne til å tåle strekk- og trykkpåkjenninger kan sies å være såpass stor at de eventuelle påkjenningene fra gjentatte fryse/tinesykluser har liten innvirkning på materialets styrke.

Strekk- og trykkfastheten på PU-skummet produsert i felt med sprøyteskum er større sammenlignet med skummet produsert på laboratorium. Forskjellen skyldes sannsynligvis at det er benyttet pour-skum ved framstilling av skum på laboratorium.

Måling av materialets strekk- og trykkfasthet baseres på en automatisert metode, og det knyttes stor nøyaktigheten til målte resultater. For selve gjennomføringen er det heller ikke funnet store usikkerhetsmomenter som er utslagsgivende for resultatene.

9.3 Overvåkning av kvalitet i felt

Ved produksjon av PU-skum i felt er det nødvendig å gjennomføre ulike tester for å kartlegge kvaliteten på skummet. Testprosedyrene som er beskrevet omhandler undersøkelser for:

- Densitet
- Mekaniske egenskaper
- Materialets sprøhet/elasticitet (slagtest)
- Heft

Testprosedyrene baseres på enkle metoder for gjennomføring, som med små tiltak kan gjennomføres i felt. Testene er nødvendige for å avdekke mulige feil i produksjonen.

9.4 Gjennomføring av neste fullskala prosjekt

Per dags dato er metoden med PU-skum som omfyllingsmasse kun utført i fullskala i prosjektet ved Lille Måsevann. Her ble utfordringer som knyttes til utførelse av metoden avdekket for første gang. Det foreligger nå mer erfaring, kunnskap og forskning bak metoden til å kunne gjennomføre et prosjekt på en mer gunstig måte. For videre utvikling av metoden er det nødvendig å gjennomføre flere fullskalaprojekt.

Prosjektet må ta høyde for de utfordringene som ble kartlagt ved Lille Måsevann – spesielt nedbør, fukt og heftkapasitet i bend.

I prosjektet ved Lille Måsevann ble ulike metoder for påføring av skummet gjennomført. Flere prosjekter er nødvendig for å standardisere en industrialisert prosess for påføring av PU-skum. Metoden må være praktisk mulig å gjennomføre i felt, samtidig som tidligere avdekte utfordringer må tas høyde for.

9.5 Videre arbeid

Videre arbeid bør i hovedsak baseres på å utarbeide en gunstig metode for påføring av PU-skum på røroverflaten. Påføringsmetoden bør utvikles som en industriell prosess som tar høyde for de begrensningene som er knyttet opp til bruk av metoden. Påføringsmetoden bør også være effektiv, og praktisk mulig å gjennomføre i felt.

PU-skum som omfyllingsmasse er, per dags dato, ikke inkludert i gjeldende regelverk som omhandler nedgravde rørgater. Det er nødvendig å få metoden verifisert – og bygging av klasse 0 anlegget ved Lille Måsevann var første seg. NVE må ta stilling til om skummet kan anerkjennes som godkjent omfyllingsmasse før det vurderes om det er behov for utvikling av et eget regelverk/retningslinje, eller om bruk av PU-skum kan inkluderes i gjeldende regelverk.

For videre forskning er det også andre faktorer som med fordel bør undersøkes.

- **pH-verdi**

Det bør undersøkes om pH-verdien til jordsmonnet har innvirkning på levetiden til skummet. Dersom pH-verdien er av innvirkning, bør det undersøkes i hvilken grad dette er gjeldende.

- **Celleveggenes tykkelse**

I forsøk ved NTNU er det hittil ikke gjort undersøkelser av celleveggenes tykkelse, og hvilken innvirkning tykkelsen har på skummets egenskaper. Det er sannsynlig at tykkelsen på celleveggen vil ha innvirkning på materialets evne til å absorbere vann, og sannsynligvis også innvirkning på mekaniske egenskaper. I hvor stor grad innvirkningen er utslagsgivende er foreløpig usikkert.

- **Friksjonen mellom skumoverflate og tilbakefylte masser**

Friksjonen mellom skumoverflate og tilbakefylte masser er en viktig faktor for å kunne regne stabilitet mot glidning på bratte strekninger, eller ved forankring av bend. I arbeidet til Svalesen (2015) var det forutsatt at skummet skulle støpes mot grøfteveggen – det er ikke tilfellet med bruk av sprøyteskum. Sprøyteskummet får en glatt overflate på rørets topp og sider, mens det får en ru overflate mot drenglaget i grøftebunnen. Det må studeres i hvor stor grad jordkornene trenger inn i skummets overflate, og hvilken friksjonskoeffisient som kan legges til grunn ved stabilitetsberegning

Referanseliste

- Aaker, S. L., 2017. *Forankring av bend på rørgater med PU-skum*. Trondheim: NTNU.
- ASTM International, 2006. *Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastics*, West Conshohocken: ASTM International.
- Berge, S., 2011. *Havromsteknologier: materialteknologi*, Trondheim: NTNU Institutt for marin teknikk.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. & DeWitt, D. P., 2006. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th edition. I: s.l.:Wiley, pp. 273-274.
- 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.
- Chemtrend, u.d. *A Broad Array of Solutions to the Challenges Faced by Polyurethane Molders*. [Internett]
Available at: http://www.chemtrend.com/application/polyurethane_molding
- 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.
- Covestro AG, 2016. *Polyols*. [Internett]
Available at: <http://www.polyurethanes.covestro.com/en/Products/What-are-Polyurethanes/Polyols>
[Funnet 31 Mai 2017].
- Finnmarkseiendommen, 2016. *Styremøter og møteprotokoller 2016*. [Internett]
Available at: <http://www.fefo.no/no/fefo/Documents/Styremoter/Styresaker/2016/2016-06-20%20Styresaker%20Lakselv/Sak%2043-2016%20Styresak%20Lille%20M%C3%A5sevann%20pumpe%20m.fl.pdf>
[Funnet 29 Februar 2017].
- Frey Publishing, 2014. *Prøving av materialenes mekaniske egenskaper del 1: Strekkforsøket*. [Internett]
Available at: <http://frey.no/wp-content/uploads/2014/01/4.1-Strekkfors%C3%B8ket.pdf>
[Funnet 16 April 2017].
- Future Pipe Industries, u.d. *Fiberstrong® Installation guide for underground pipe system*, s.l.: Future Pipe Industries.
- GRACO, u.d. *Products*. [Internett]
Available at: <http://www.graco.com/no/no/products/coatings-and-foam/reactor-h-25-h-40-and-h-50.html>
[Funnet 3 Mars 2017].

- Johnsen, N., 2016. *Legging av rørgater med PU-skum*. Trondheim: NTNU.
- Kapps, M. & Buschkamp, S., 2004. *The production of rigid polyurethane foam*. Leverkusen: Bayer Material Science AG, Business Development - Insulation.
- Lia, L., 2016. *Forelesningsnotat fra Vassdragsteknikk VK (TVM 4128)*. Trondheim: NTNU.
- Lia, L. et al., 2015. *The current status of hydropower development and dam construction in Norway*, s.l.: Hydropower and dams.
- Lovdata, 2010. *Damsikkerhetsforskriften*. [Internett]
Available at: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-12-18-1600/KAPITTEL_5#KAPITTEL_5
[Funnet 4 Oktober 2016].
- M3, u.d. *Isocyanates*. [Internett]
Available at: <http://multimedia.3m.com/mws/media/777847O/isocyanates-3m-techupdate.pdf>
[Funnet 1 Juni 2017].
- Norges vassdrag- og energidirektorat, 2012. *Søknad om Lille Måsevatn pumpe og tilleggsoverføringer til Adamselv kraftverk, Lebesby kommune, Finnmark*, Oslo: Norges vassdrag- og energidirektorat.
- Norges vassdrags- og energidirektorat, 2011. *Retningslinjer for stenge- og tappeorganer, rør og tverrslagsporter*, Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Norges vassdrags- og energidirektorat, 2017. *Energi*. [Internett]
Available at: https://www.nve.no/Media/5258/ny_kraft_tillatelser_og_utbygging_4kv_16.pdf
[Funnet 7 Februar 2017].
- PU Nordic, u.d. *Varmeisolasjonsmaterialer av stivt polyuretanskum*. s.l.:s.n.
- Sivertsen, K., 2007. *Materials, science and engineering: Polymer foams*. [Internett]
Available at: https://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-063-polymer-physics-spring-2007/assignments/polymer_foams.pdf
[Funnet 10 Februar 2017].
- Statkraft AS, u.d. *Energikilder: Våre kraftverk og kontorer: Norge: Adamselv*. [Internett]
Available at: <http://www.statkraft.no/Energikilder/vaare-kraftverk/norge/Adamselv/>
[Funnet 28 Februar 2016].
- Store norske leksikon, 2016. *Fysikalsk kjemi*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/hygroskopisk>
- Store Norske Leksikon, 2016. *Kjemi*. [Internett]
Available at: https://snl.no/eksoterm_prosess
- Store norske leksikon, 2016. *Varme- og stofflære*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/oppdrift%2Ffysikk>
[Funnet 7 Oktober 2016].

Støren, S., 2009. *Store norske leksikon: Strekkprøving*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/strekkpr%C3%B8ving>
[Funnet 13 April 2017].

Svalesen, T. O., 2015. *Omfyllingsmasser for røyrgater i bratt terreng*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

Sørensen, B. R., u.d. *Varmetransport*. [Internett]
Available at:
<http://ansatte.hin.no/brs/fag/emner/tdyn/docs/Varmel%C3%A6re%20del%202.pdf>
[Funnet 13 Mars 2017].

Thaulow, C., 2009. *Store norske leksikon: trykkfasthet*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/trykkfasthet>
[Funnet 14 April 2017].

Thirumal, M., Khastgir, D. & Singha, N., 2008. *Effect of foam density on the properties of water blown rigid polyurethane foam*. s.l.:Wiley InterScience.

Václavík, V. et al., u.d. *Polyurethane foam as aggregate for thermal insulating mortars and lightweight concrete*, s.l.: s.n.

Vedlegg

- Vedlegg 1** Datablad fra Covestro: Sprøyteskum benyttet i pilotprosjektet ved Lille Måsevann pumpestasjon
- Vedlegg 2** Datablad fra Covestro: Pour-skum benyttet i pilotprosjektet ved Lille Måsevann pumpestasjon
- Vedlegg 3** Bilder fra byggeperioden ved Lille Måsevann pumpestasjon
- Vedlegg 4** Resultater strekkfasthet (alle prøver)
- Vedlegg 5** Resultater trykkfasthet (alle prøver)
- Vedlegg 6** Veileder for bruk av polyuretanskum som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater
- Vedlegg 7** Artikkel "PU-foam in buried penstocks" til konferansen Hydro 2017, Hydropower & Dams
- Vedlegg 8** Forklaring på eget bidrag til "Veileder for bruk av polyuretanskum som omfyllingsmasse rundt nedgravde rørgater" og artikkelen "PU-foam in buried penstocks"

Vedlegg 1

Datablad fra Covestro: Sprøyteskum benyttet i pilotprosjektet ved Lille Måsevann pumpestasjon

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	<p>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.</p> <p>The overall density of the foam including the layers is typically significantly higher than the free rise density because of the multiple layers.</p> <p>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.</p>
-------------	--

Vedlegg 2

Datablad fra Covestro: Pour-skum benyttet i pilotprosjektet ved Lille Måsevann pumpestasjon

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 3

Bilder fra byggeperioden ved Lille Måsevann pumpestasjon



Figur 1 Siltige masser i grøftebunnen

I prosjekteringen av pilotprosjektet ved Lille Måsevann pumpestasjon ble det forespeilet en stor andel fjellmasser i rørtraseen. Ved utgraving av grøfta uteble funnene av fjell – isteden ble det gjort funn av svært siltige masser.

De siltige massene kompliserte den planlagte fremgangsmåten for påføring av skum. Den opprinnelige planen var å unngå bruk av drenasjerør, pukk og filterduk i grøftebunnen. Røret skulle legges direkte i de stedlige massene, og skummet skulle påføres i grøfta. Forholdene i grøfta gjorde det nødvendig å gjennomføre tiltak i forkant av påføring av PU-skummet.



Figur 2 Grøftebunnen inneholdt ikke stabile masser

Figur 2 viser hvorfor det var nødvendig å gjennomføre tiltak i grøftebunnen. Ved omrøring av de siltige massene ble tilstanden forverret, og røret ville ikke fått tilstrekkelig stabilitet i bæresonen dersom tiltak ikke hadde blitt gjennomført.



Figur 3 Legging av GRP-rør

Figur 3 viser nedsenkning av GRP-rør i grøfta. Her er også effekten av tiltakene som ble gjort i grøftebunnen synlig. Pukk og sprengsteing i bæresonen, i kombinasjon med drenasjerør og filterduk, gjorde underlaget stabilt for røret å hvile på.



Figur 4 Rørets kurvatur

Figur 4 viser legging av GRP-rør og rørets kurvatur i grøftetraseen. Til venstre på figuren vises Lille Måsevann – inntaket for pumpestasjonen.



Figur 5 Bygging av enkel forskalingsløsning

Første påføringsmetode som ble gjennomført var en enkelt forskalingsløsning. Figur 5 viser bygging av forskalingen. Plastduken, som er synlig under røret, ble lagt for å forhindre at PU-skummet skulle komme i kontakt med vann i løpet av produksjonen.



Figur 6 Påføring av skum med bruk av enkel forskalingsmetode

Når den enkle forskalingen var ferdig bygd, ble skummet tilført. Som det fremstår fra bildet, ble forskalingen avgrenset rundt rørets periferi i hver ende. Grunnet avgrensningen ekspanderte skummet vertikalt (mot fri flate) i forskalingen.

Metoden var svært væravhengig og delvis tidkrevende. Ved nedbør ble det utfordrende å utføre arbeidet, siden skummet må reagere på tørr overflate. Hver gang arbeidet forflyttet seg måtte dessuten forskalingen bygges på nytt. Det ble videre sett på løsninger som håndterte de nevnte utfordringene.



Figur 7 Videreutviklet forskalingsmetode med tak og løfteanordning

Løsningen for å skjerme for vær og vind ble en flyttbar forskaling – utstyrt med tak. Taket gjorde det mulig å arbeide i perioder med nedbør, og løfteanordningen gjorde det enklere å flytte forskalingen i takt med arbeidet som forflyttet seg. Når forskalingen var plassert rundt røret ble den fylt seksjonsvis, og etterlot et skumtværnsnitt som vist på figur 8.



Figur 8 Resulterende skumtværnsnitt når forskalingen ble fjernet



Figur 9 Påføring av sprøyteskum på områder som manglet omfylling

For å ferdigstille skumtværssnittet rundt røret etter at forskalingen var fjernet, ble overkant at røret omfylt med sprøyteskum. Sprøyteskum har som kjent en raskere ekspansjonstid sammenlignet med pour-skum. Tidligere ble det benyttet pour-skum for å fylle forskalingen. Pour-skum ble benyttet for å sikre at hele forskalingen ble fylt når skummet ekspanderte. Hvordan arbeidet med å ferdigstille skumtværssnittet ble utført, er vist på figur 9.



Figur 10 "Klo" benyttet som lukket forskaling

Som en annen forskalingsløsning ble "kloen", som fungerte som en lukket forskling, benyttet. Ved hjelp av en mekanisk lukke-/åpneanordning ble den festet rundt røret. Metoden var utfordrende, da den krevde en veldig nøyre avrettet og utformet grøftebunn for å sørge for riktig plassering av forma rundt røret. Når forma var korrekt plassert ble den fylt med pour-skum via åpninger i overflaten. Det endelige resultatet er vist på figur 11.



Figur 11 Resulterende skumtværsnitt ved bruk av lukket forskaling



Figur 12 To personer ansvarlig for påføring direkte på rør

Den siste metoden som ble gjennomført for påføring av skummet, var direkte påføring ved bruk av sprøyteskum. Metoden var enkel i den forstand at det ikke var nødvendig med annet maskineri enn den mekaniske blandingspumpa og sprøytepipstolen for påføring. Ved bruk av tidligere forskalingsløsninger var man avhengig av maskineri for å flytte forskalingsen når arbeidet forflyttet seg. Ved påføring direkte på røret ble arbeidet i mye større grad mobilt.



Figur 13 Påføring direkte på rør med bruk av sprøyteskum

Personen ansvarlig for påføring påførte tynne lag (20-30 mm) med PU-skum for å unngå høy varmeutvikling. Etter avkjøling ble det påført et nytt lag. Syklusen ble gjentatt til ønsket tykkelse var oppnådd.

Arbeidet var fysisk krevende for personen som utførte arbeidet. Dette kommer fram av bildet over. Arbeidet medfører tunge løft, og kan være svært belastende.



Figur 14 Rettstrekke lagt med PU-skum som omfyllingsmasse

Figur 14 viser før- og etterbilder av rørgata når PU-skum er benyttet som omfyllingsmasse. PU-skummet får en gylden farge på overflaten når materialet er eksponert for sollys over lengre tid.

Vedlegg 4

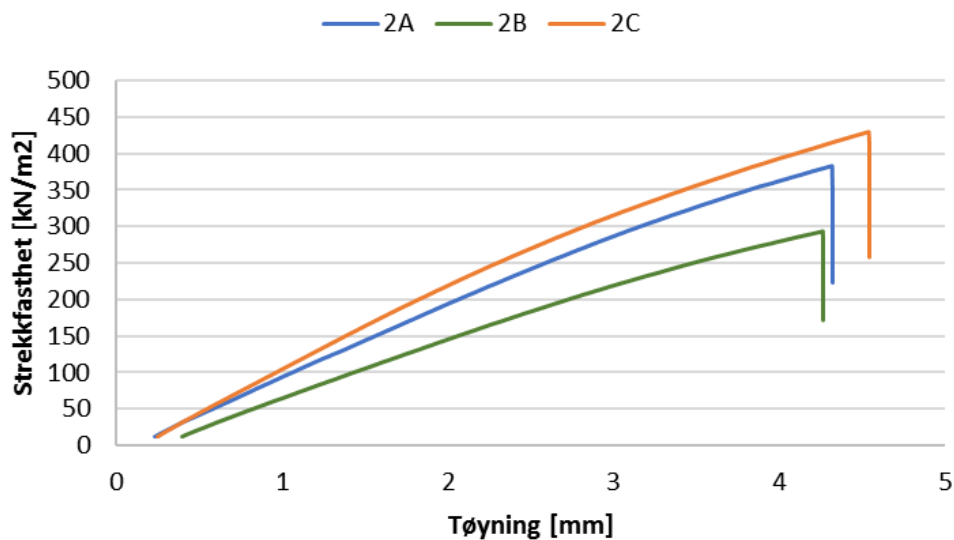
Resultater strekkfasthet (alle prøver)

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 2

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 25, 30, 25 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 56



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 384

Tøyning ved brudd [mm]: 4,3

B: Nedfrosset

Strekkfasthet [kN/m²]: 294

Tøyning ved brudd [mm]: 4,3

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 430

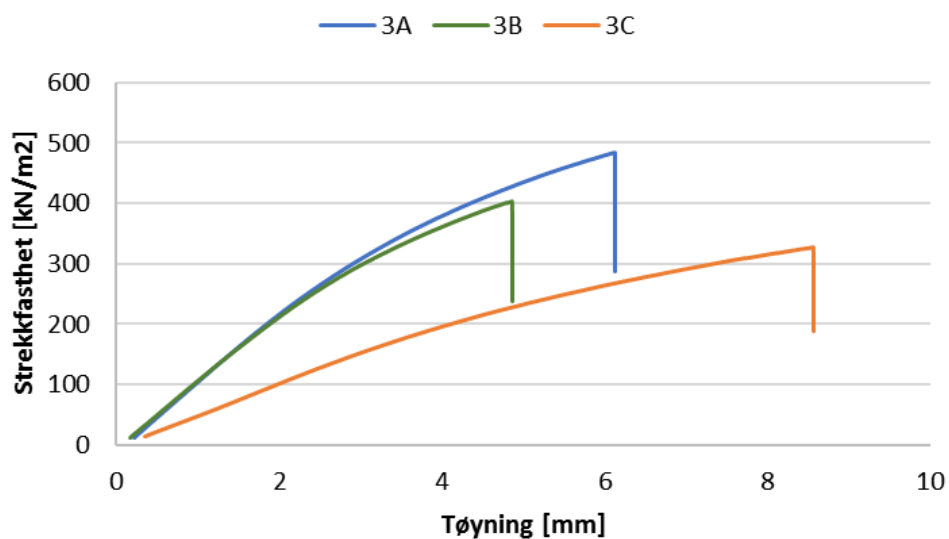
Tøyning ved brudd [mm]: 4,5

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 3

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 25, 30, 25 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 51



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 484

Tøyning ved brudd [mm]: 6,1

B: Nedfrosset

Strekkfasthet [kN/m²]: 403

Tøyning ved brudd [mm]: 4,9

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 326

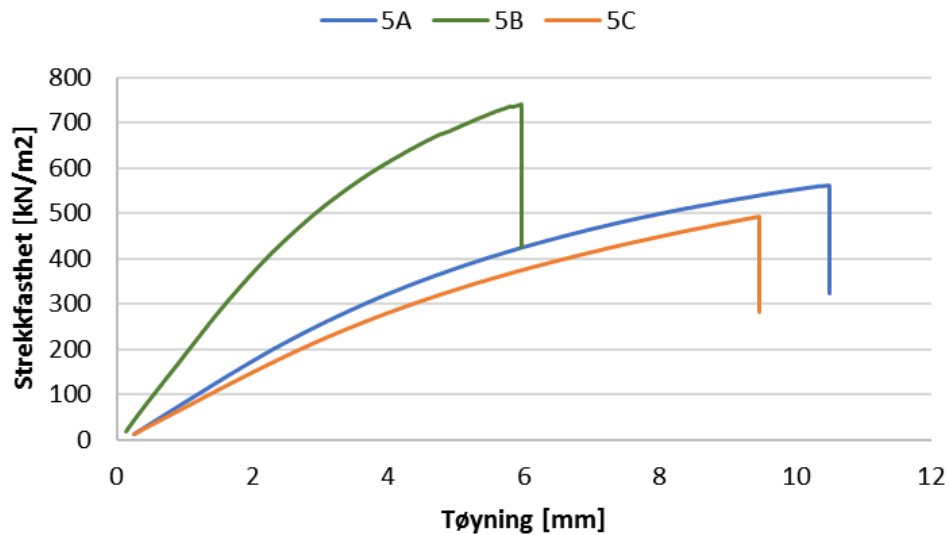
Tøyning ved brudd [mm]: 8,6

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 5

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 25, 30, 25 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 56



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 562

Tøyning ved brudd [mm]: 10,5

B: Nedfrosset

Strekkfasthet [kN/m²]: 742

Tøyning ved brudd [mm]: 6,0

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 494

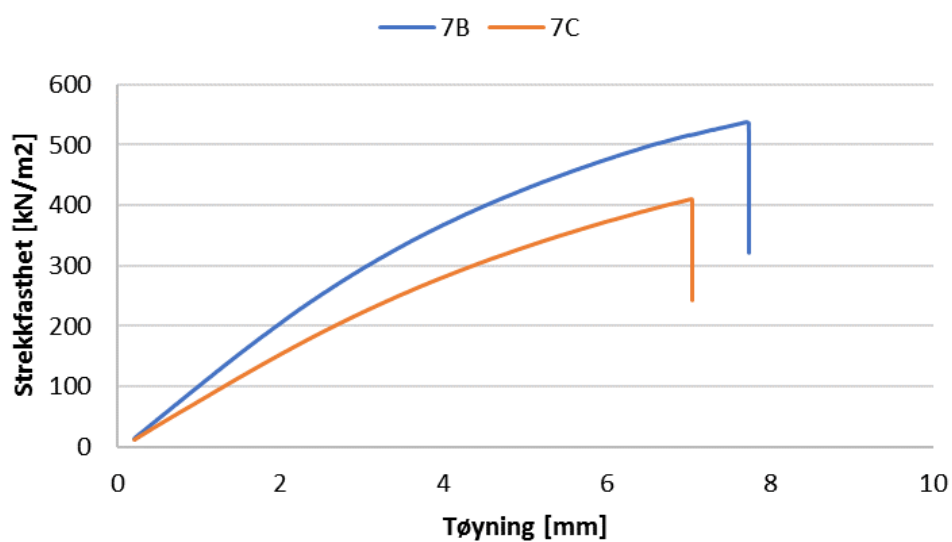
Tøyning ved brudd [mm]: 9,5

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 7

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 35, 45, 35 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 55



B: Nedfrosset

Strekkfasthet [kN/m²]: 537

Tøyning ved brudd [mm]: 7,7

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 411

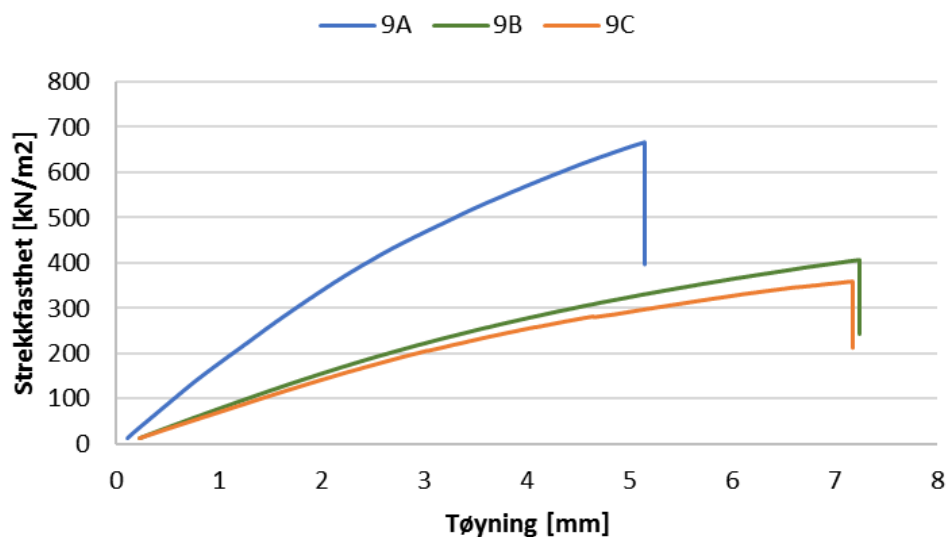
Tøyning ved brudd [mm]: 7,0

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 9

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 35, 45, 35 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 56



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 666

Tøyning ved brudd [mm]: 5,1

B: Nedfrosset

Strekkfasthet [kN/m²]: 407

Tøyning ved brudd [mm]: 7,2

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 359

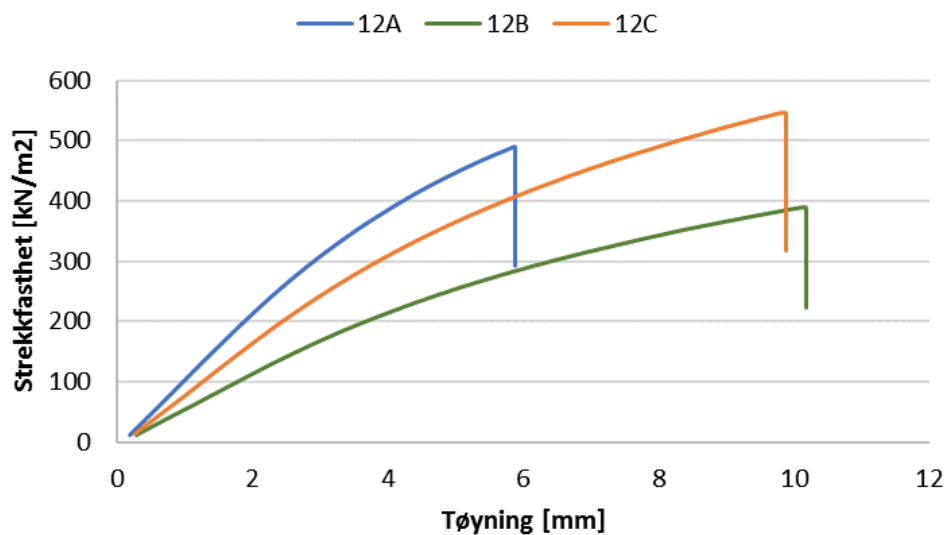
Tøyning ved brudd [mm]: 7,2

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 12

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 35, 45, 35 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 55



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 491

Tøyning ved brudd [mm]: 5,9

B: Nedfrosset

Strekkfasthet [kN/m²]: 390

Tøyning ved brudd [mm]: 10,2

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 548

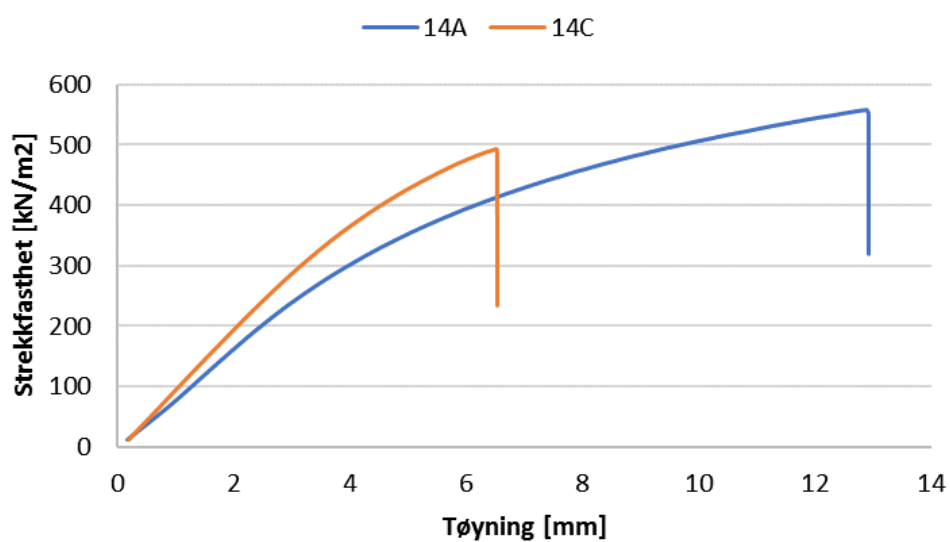
Tøyning ved brudd [mm]: 9,9

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 14

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 40, 45, 40 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 60



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 559

Tøyning ved brudd [mm]: 12,9

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 493

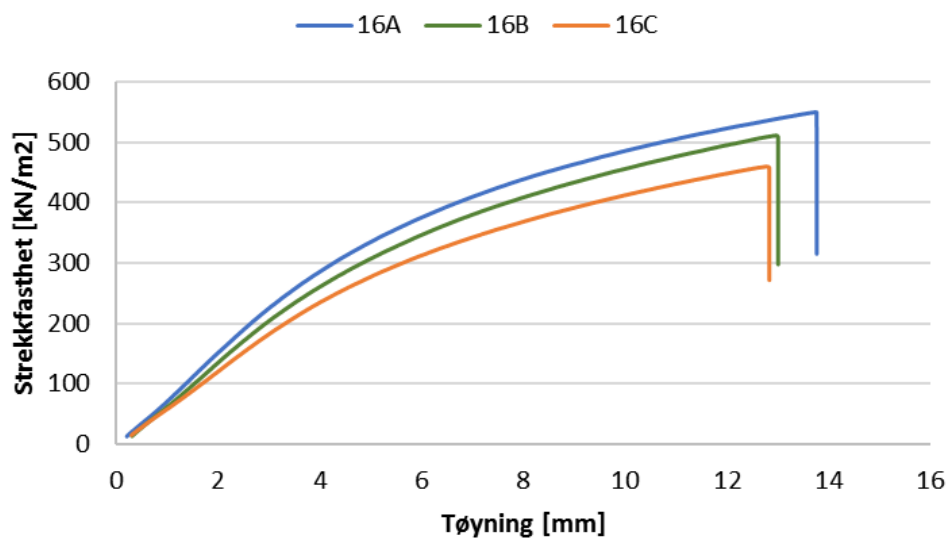
Tøyning ved brudd [mm]: 6,5

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 16

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 40, 45, 40 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 62



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 550

Tøyning ved brudd [mm]: 13,8

B: Nedfrosset

Strekkfasthet [kN/m²]: 511

Tøyning ved brudd [mm]: 13,0

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 460

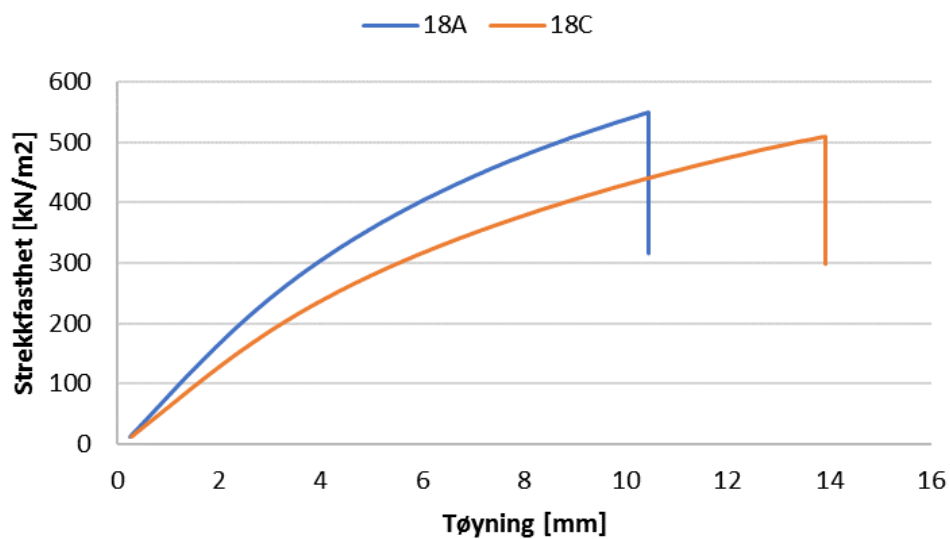
Tøyning ved brudd [mm]: 12,8

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 18

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 45, 50, 45 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 51



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 549

Tøyning ved brudd [mm]: 10,5

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 509

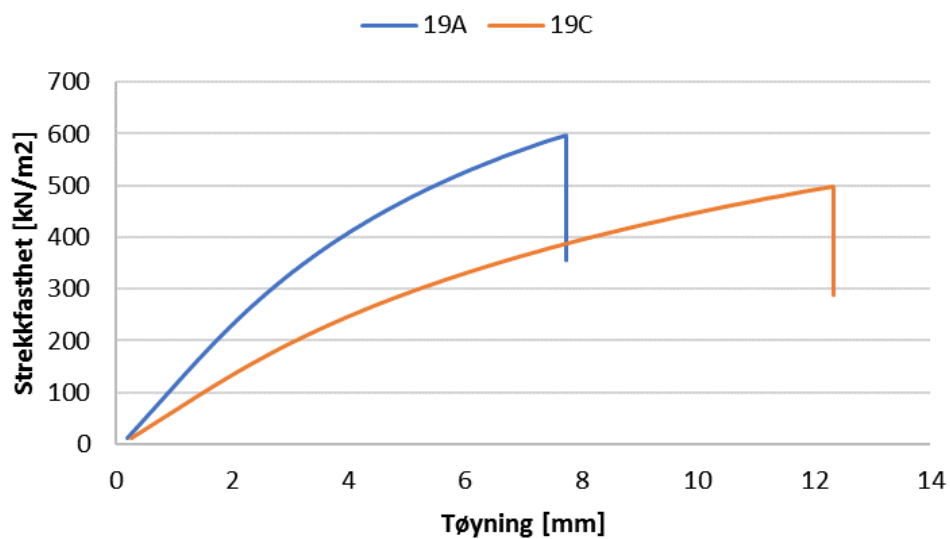
Tøyning ved brudd [mm]: 13,9

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 19

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 50, 55, 50 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m^3]: 53



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m^2]: 598

Tøyning ved brudd [mm]: 7,7

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m^2]: 499

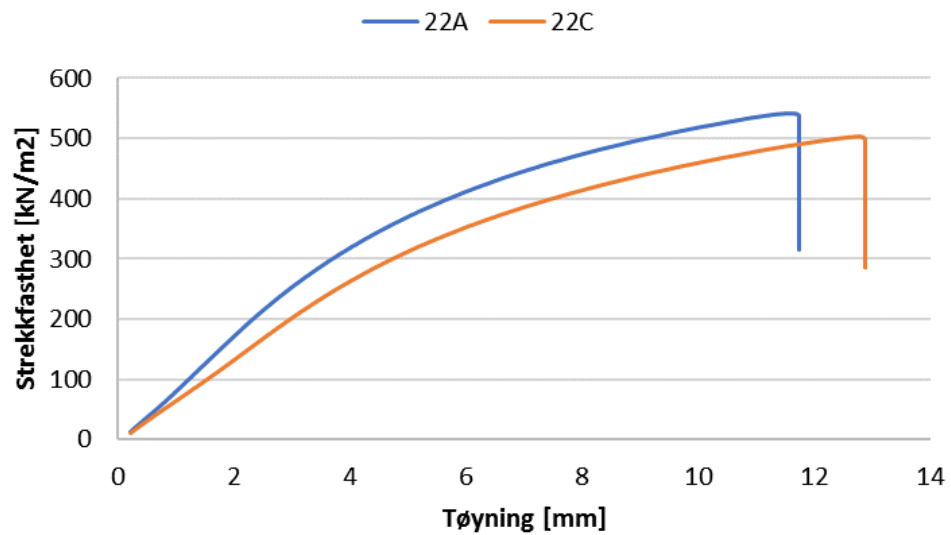
Tøyning ved brudd [mm]: 12,3

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 22

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 30, 40, 35 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 51



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 541

Tøyning ved brudd [mm]: 11,7

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 504

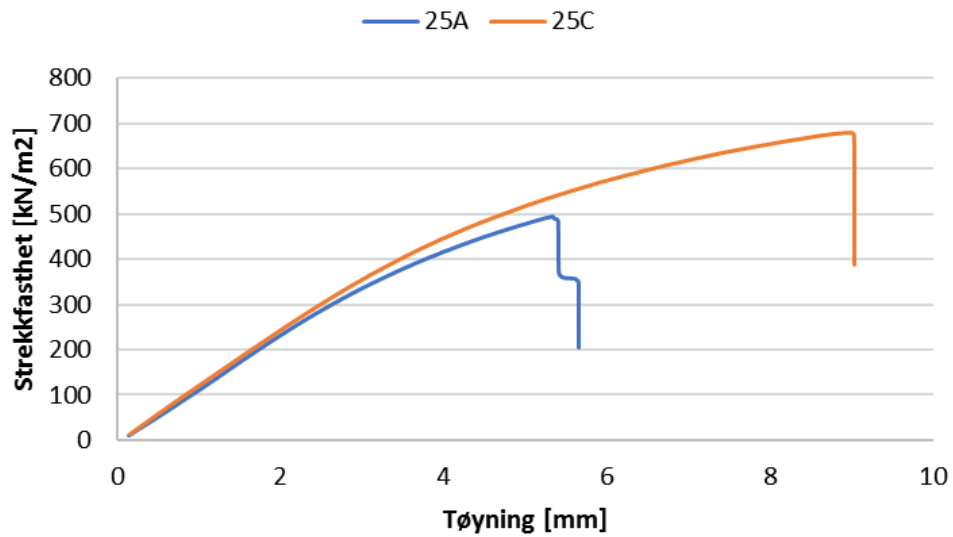
Tøyning ved brudd [mm]: 12,9

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 25

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 40, 40, 40 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 67



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 493

Tøyning ved brudd [mm]: 5,7

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 680

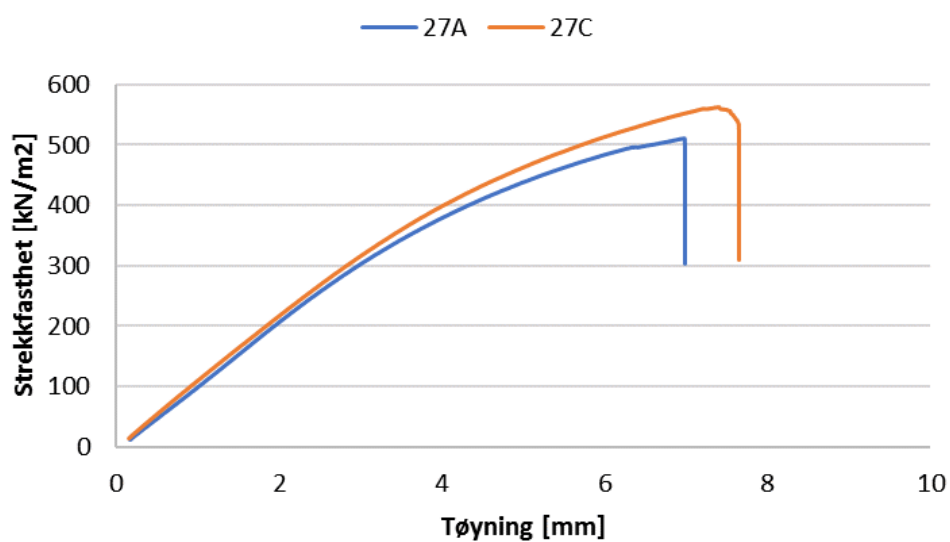
Tøyning ved brudd [mm]: 9,0

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 27

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 45, 45, 45 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 65



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 510

Tøyning ved brudd [mm]: 7,0

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 563

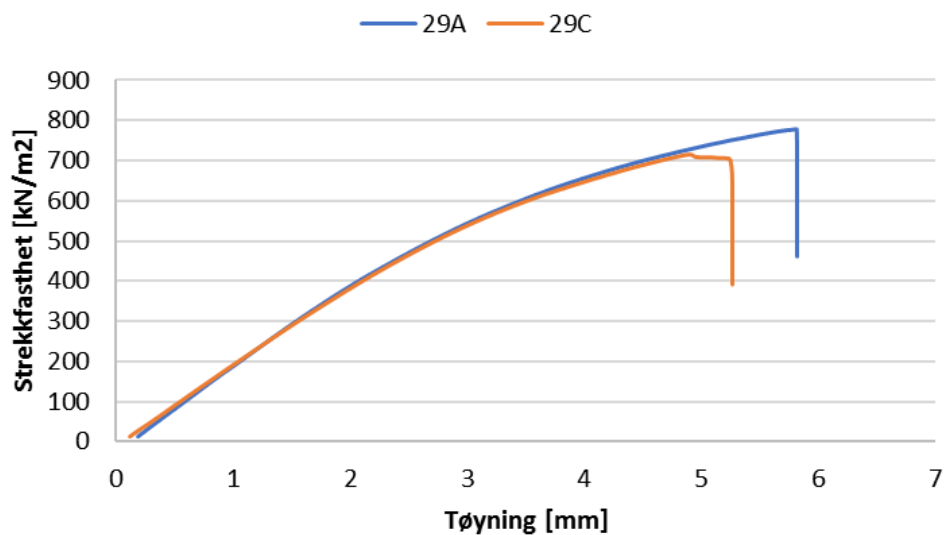
Tøyning ved brudd [mm]: 7,6

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 29

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 45, 45, 45 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 68



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 779

Tøyning ved brudd [mm]: 5,8

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 715

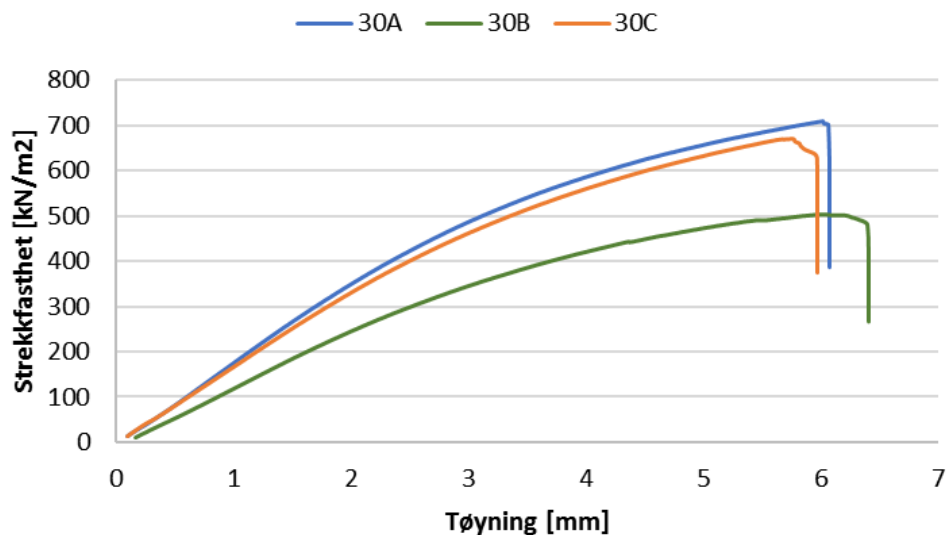
Tøyning ved brudd [mm]: 5,3

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 30

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 45, 45, 45 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m^3]: 72



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m^2]: 709

Tøyning ved brudd [mm]: 6,1

B: Nedfrosset

Strekkfasthet [kN/m^2]: 505

Tøyning ved brudd [mm]: 6,4

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m^2]: 670

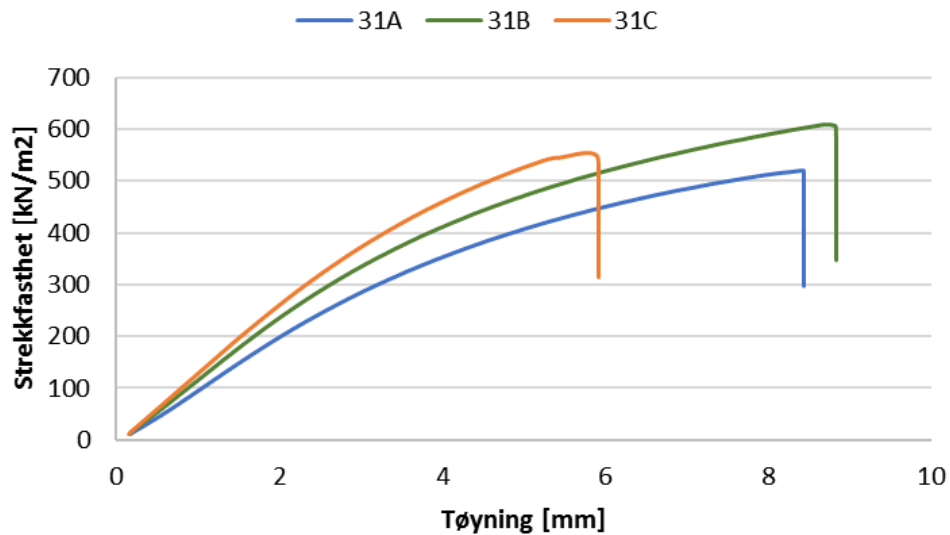
Tøyning ved brudd [mm]: 6,0

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 31

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 45, 45, 45 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 68



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m²]: 520

Tøyning ved brudd [mm]: 8,4

B: Nedfrosset

Strekkfasthet [kN/m²]: 608

Tøyning ved brudd [mm]: 8,8

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m²]: 555

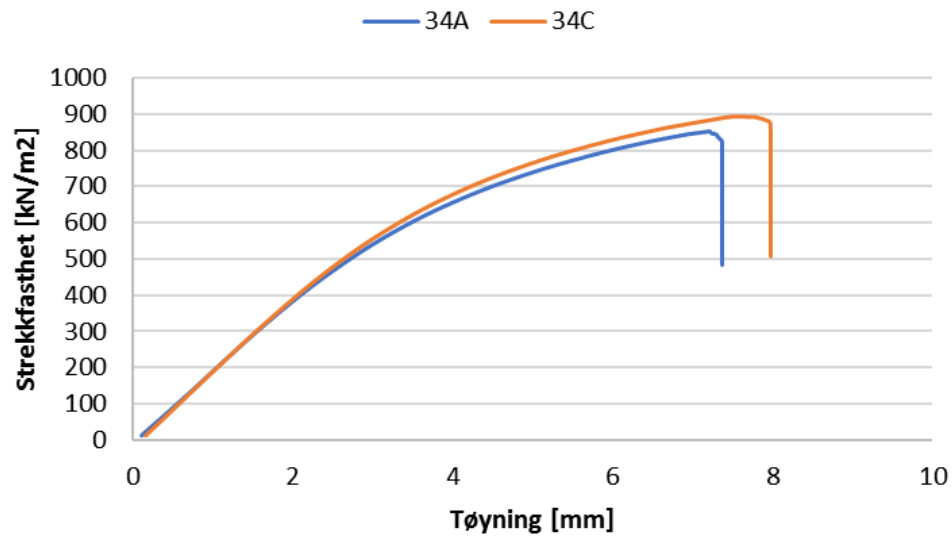
Tøyning ved brudd [mm]: 5,9

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Strekkfasthet

Prøve nr.: 34

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 45, 45, 45 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m^3]: 76



A: Ubehandlet

Strekkfasthet [kN/m^2]: 854

Tøyning ved brudd [mm]: 7,4

C: Tine/fryse

Strekkfasthet [kN/m^2]: 893

Tøyning ved brudd [mm]: 8,0

Vedlegg 5

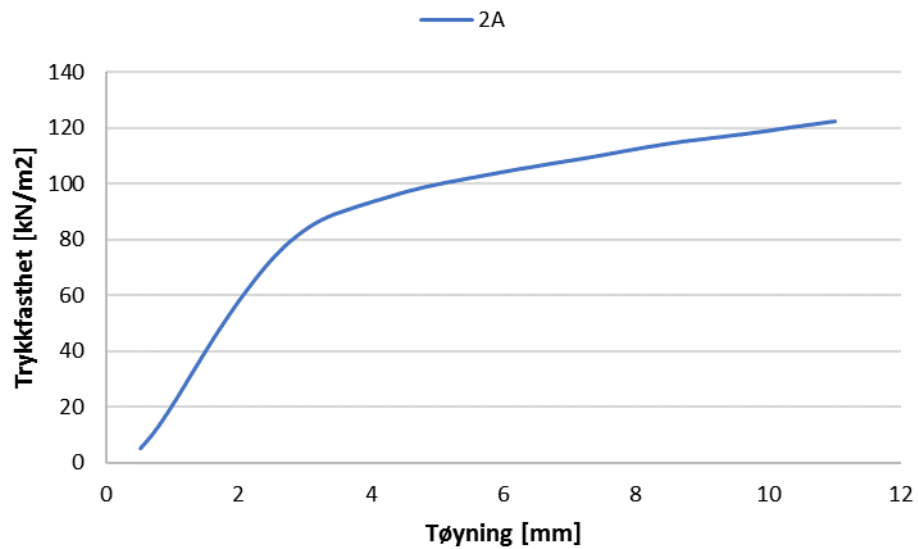
Resultater trykkfasthet (alle prøver)

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Trykkfasthet

Prøve nr.: 2

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 25, 30, 25 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 56



A: Ubehandlet

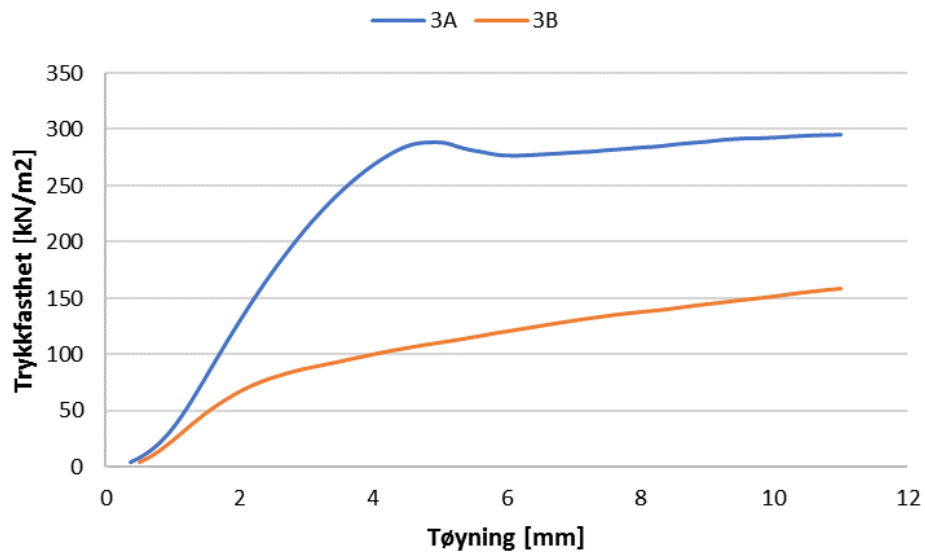
Trykkfasthet ved brudd [kN/m²]: 90

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Trykkfasthet

Prøve nr.: 3

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 25, 30, 25 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m^3]: 51



A: Ubehandlet

Trykkfasthet ved brudd [kN/m^2]: 288

B: Nedfrosset

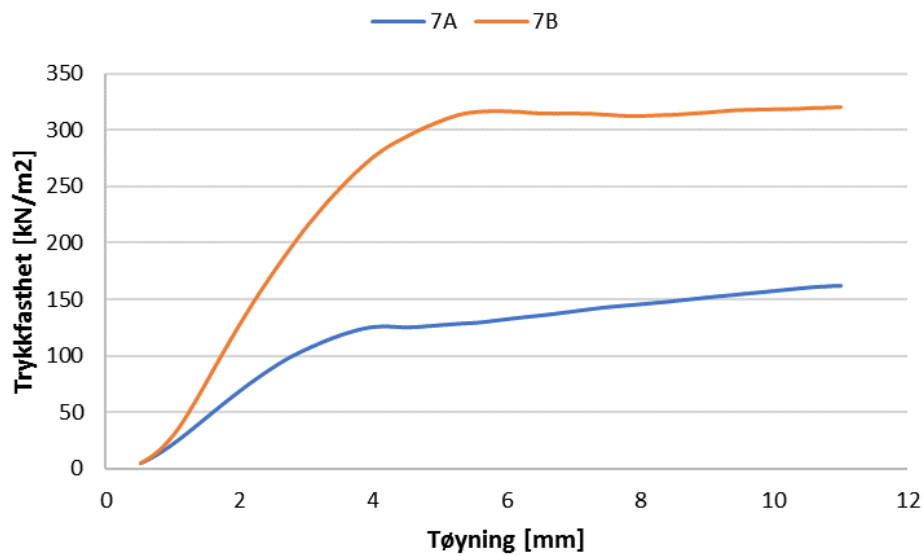
Trykkfasthet ved brudd [kN/m^2]: 86

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Trykkfasthet

Prøve nr.: 7

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 35, 45, 35 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m^3]: 55



A: Ubehandlet

Trykkfasthet ved brudd [kN/m^2]: 126

B: Nedfrosset

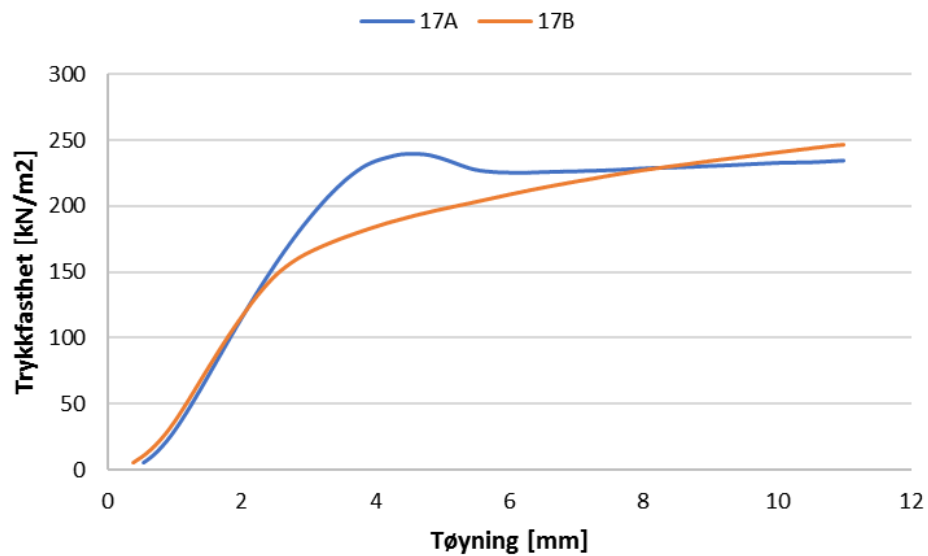
Trykkfasthet ved brudd [kN/m^2]: 315

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Trykkfasthet

Prøve nr.: 17

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 40, 45, 40 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 54



A: Ubehandlet

Trykkfasthet ved brudd [kN/m²]: 240

B: Nedfrosset

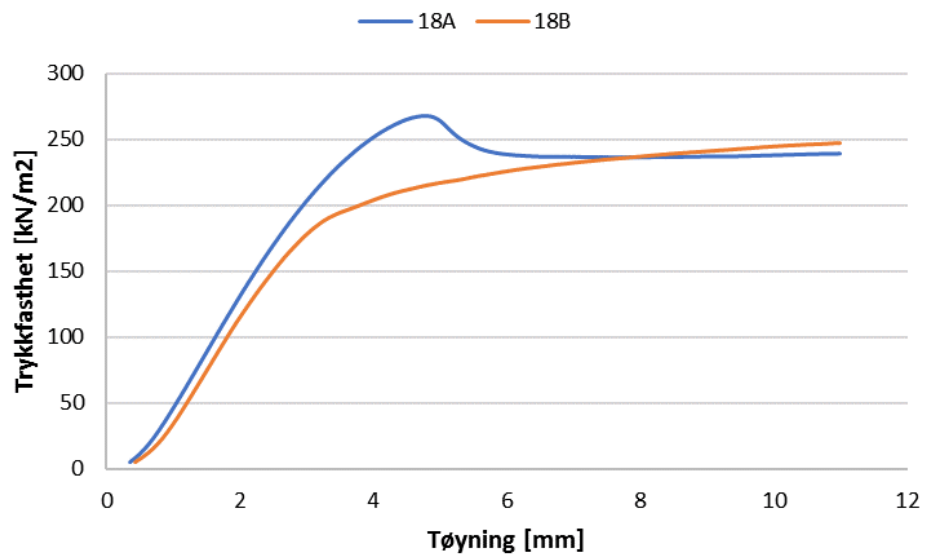
Trykkfasthet ved brudd [kN/m²]: 152

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Trykkfasthet

Prøve nr.: 18

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 45, 50, 45 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 51



A: Ubehandlet

Trykkfasthet ved brudd [kN/m²]: 268

B: Nedfrosset

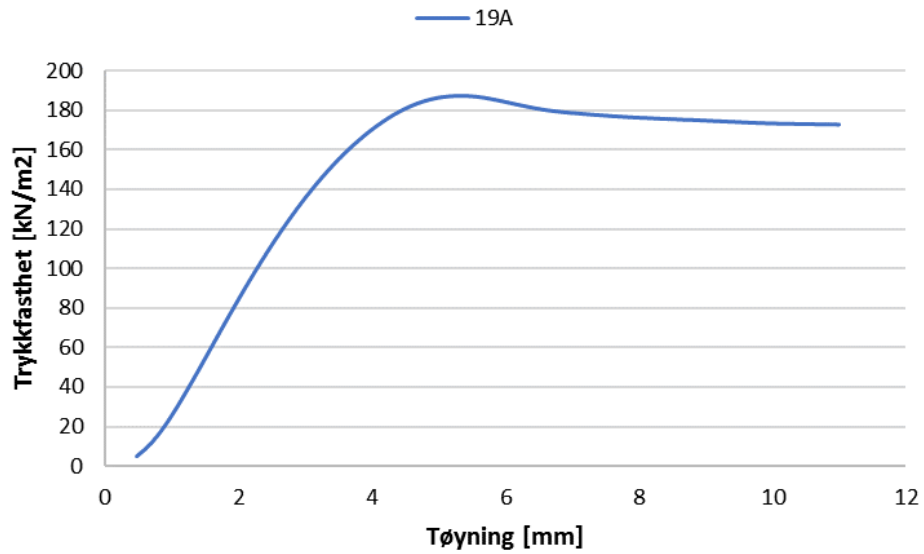
Trykkfasthet ved brudd [kN/m²]: 193

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Trykkfasthet

Prøve nr.: 19

Informasjon: Pour-skum lagt ved temperatur 50, 55, 50 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 53



A: Ubehandlet

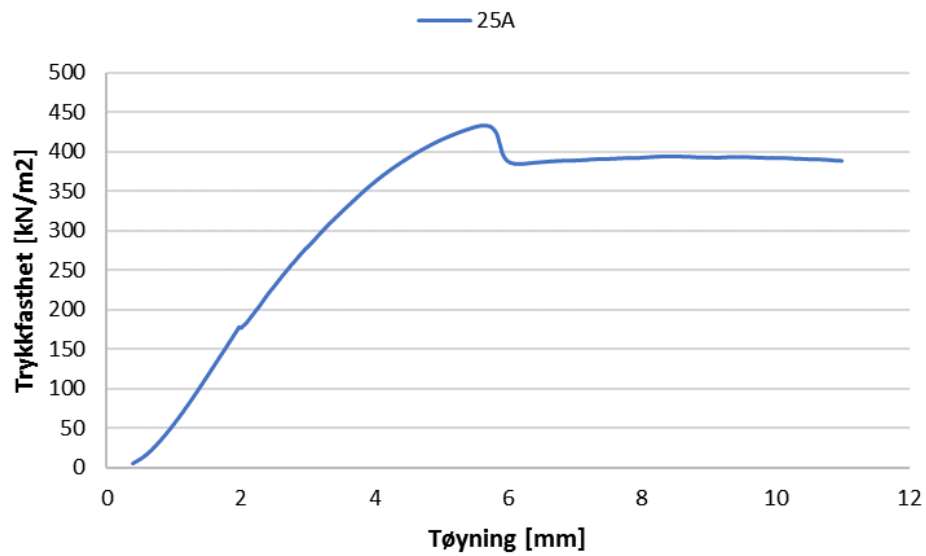
Trykkfasthet ved brudd [kN/m²]: 187

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Trykkfasthet

Prøve nr.: 25

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 40, 40, 40 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 67



A: Ubehandlet

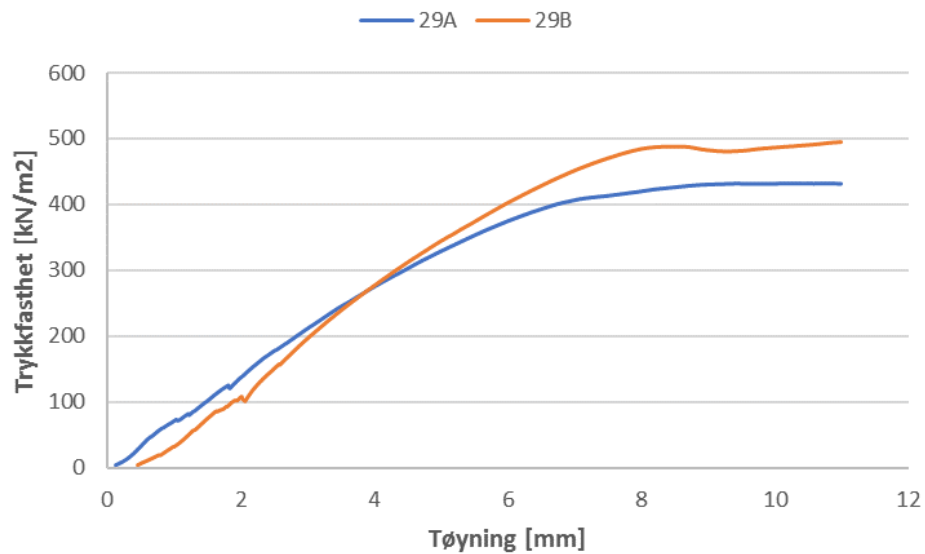
Trykkfasthet ved brudd [kN/m²]: 433

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Trykkfasthet

Prøve nr.: 29

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 45, 45, 45 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m³]: 68



A: Ubehandlet

Trykkfasthet ved brudd [kN/m²]: 430

B: Nedfrosset

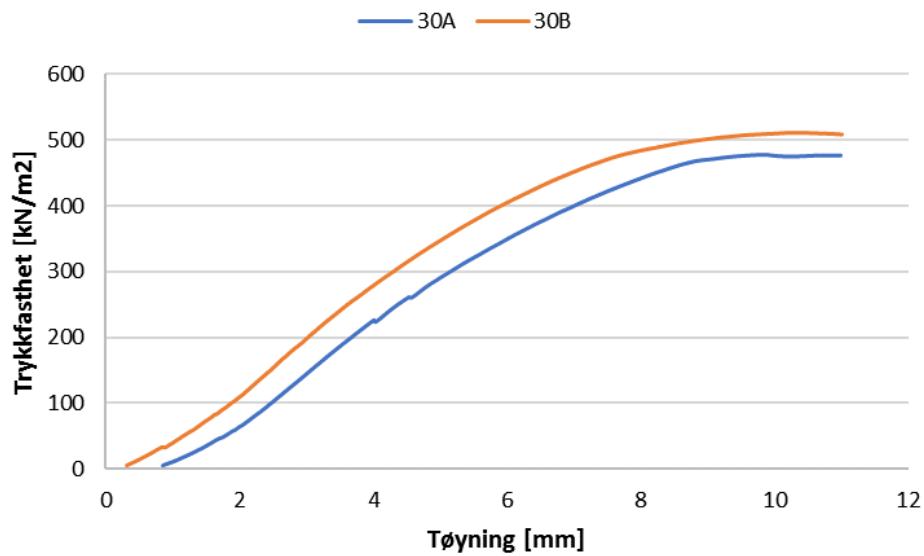
Trykkfasthet ved brudd [kN/m²]: 478

Oversikt over prøvestykkenes mekaniske egenskaper: Trykkfasthet

Prøve nr.: 30

Informasjon: Sprøyteskum lagt ved temperatur 45, 45, 45 (ISO, POL, SLANGE)

Densitet [kg/m^3]: 72



A: Ubehandlet

Trykkfasthet ved brudd [kN/m^2]: 477

B: Nedfrosset

Trykkfasthet ved brudd [kN/m^2]: 512

Vedlegg 6

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 pukke 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 rettstrækker, 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

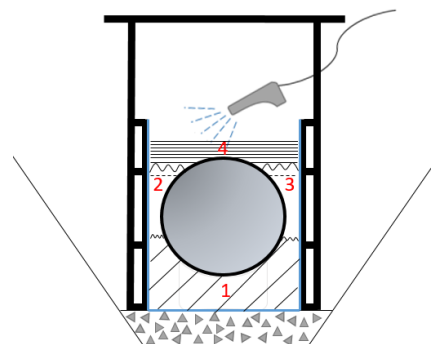
5.3.1 Bruk av pour-skum

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.

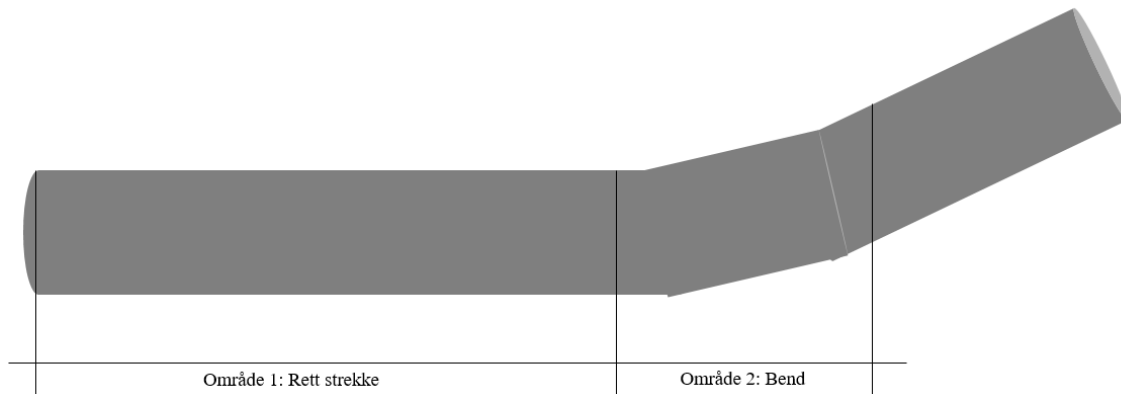
Både sprøyteskum og pour-skum kan benyttes til forankring av bend. Dersom pour-skum benyttes, bør det brukes i kombinasjon med sprøyteskum. Pour-skum anbefales i bæresonen under røret, og sprøyteskummet på resterende område rundt rørperiferien. Grunnet pour-skummets lange reaksjonstid må det sørges for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

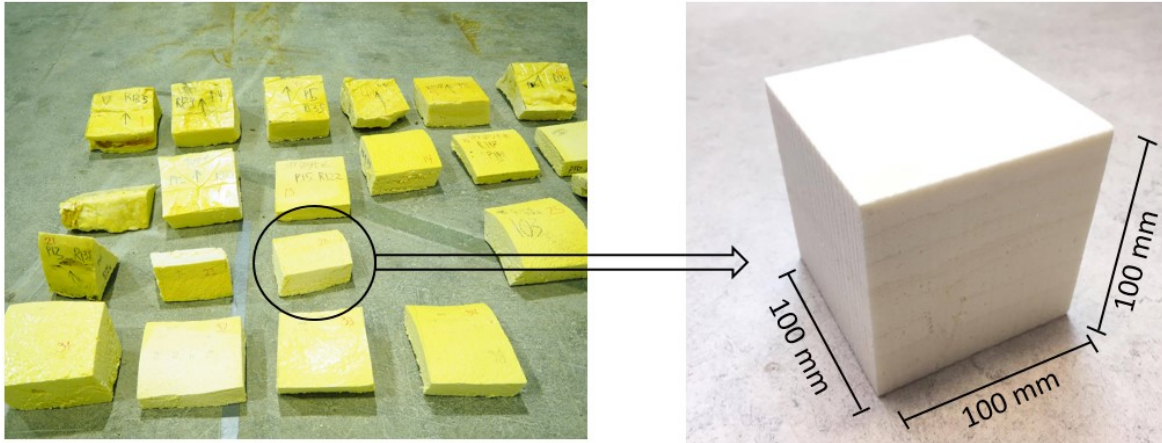
8.1 Røroverflatens temperatur

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
>70			68,2	747	454
71,9	628	494	68,2	561	
76,3	873		Standardavvik	82	11
Standardavvik	123	0	Gjennomsnitt	632	444
Gjennomsnitt	751	494	>70		

Figur 12 Sammenheng mellom densitet og PU-skummets 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.

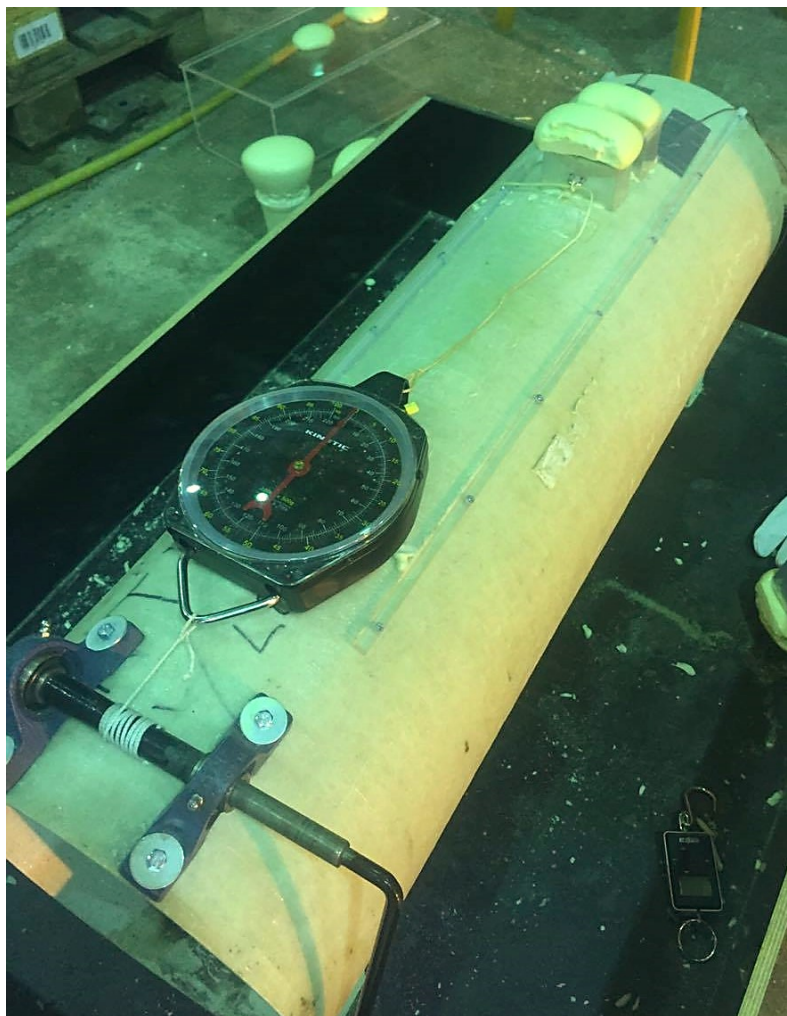
Testene bør gjennomføres kontinuerlig underveis i arbeidet, spesielt i tilfeller der forutsetningene endrer seg. Dette gjelder i tilfeller der det gjøres endringer på temperatur på komponentene, eller i tilfeller der værforholdene endrer seg og påvirker temperaturen på røroverflaten.

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 sveiveanordningen 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 sveiveanordningen. 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 7

Artikkel "PU-foam in buried penstocks" til konferansen Hydro 2017, Hydropower & Dams

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.

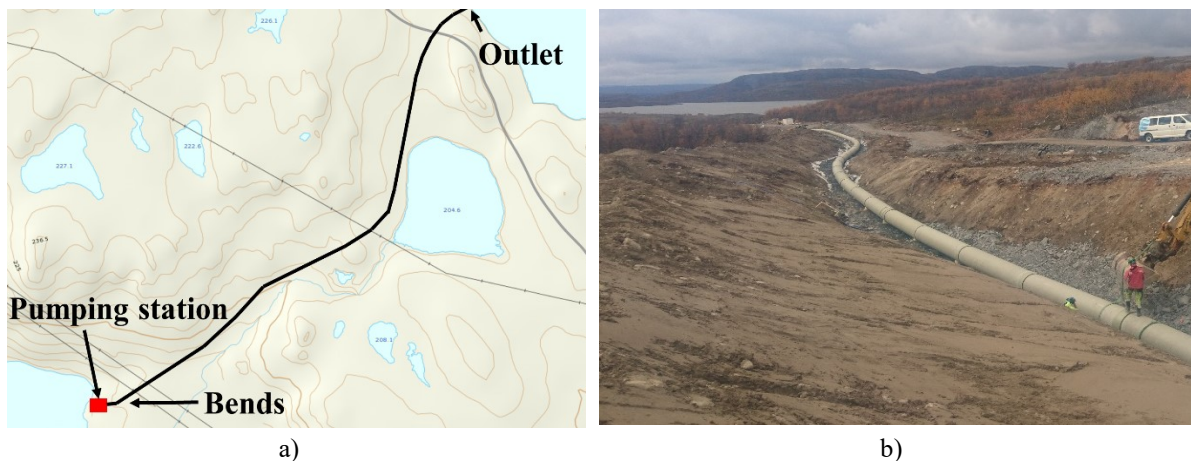


Figure 2: a) Map of the penstock alignment b) The penstock at Lille Måsevann

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 show which direction the plunger is extended. The deformations in the direction is given as decreasing values.

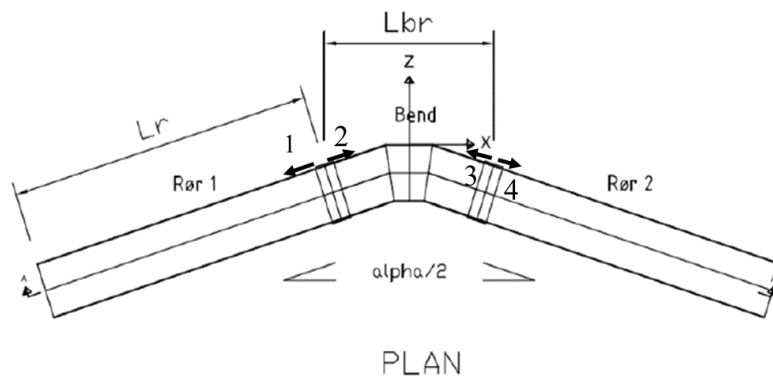


Figure 7: Placement and measured direction of the displacement transducers

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.

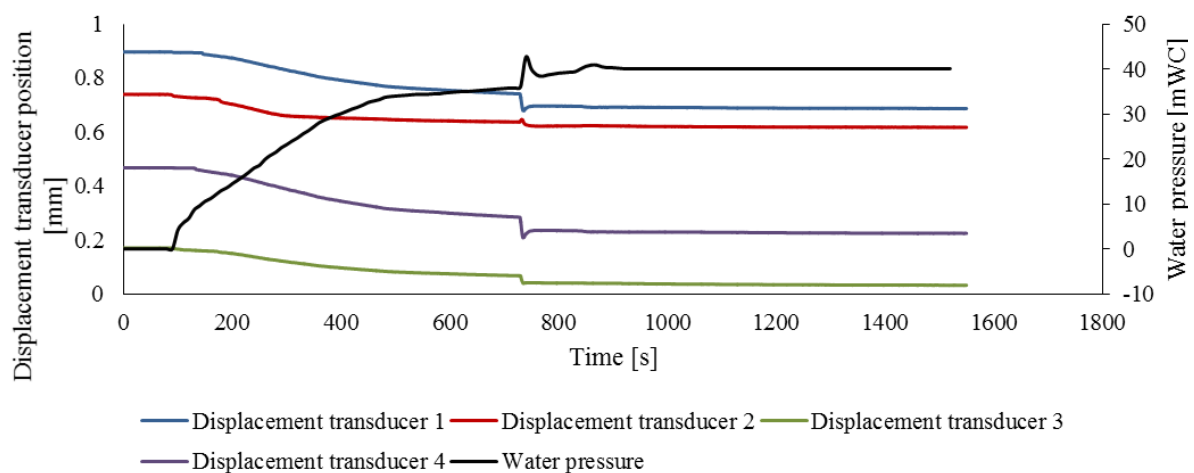


Figure 8: Deformation measurements at Lille Måsevann, 28.04.17

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 tensile 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.

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.

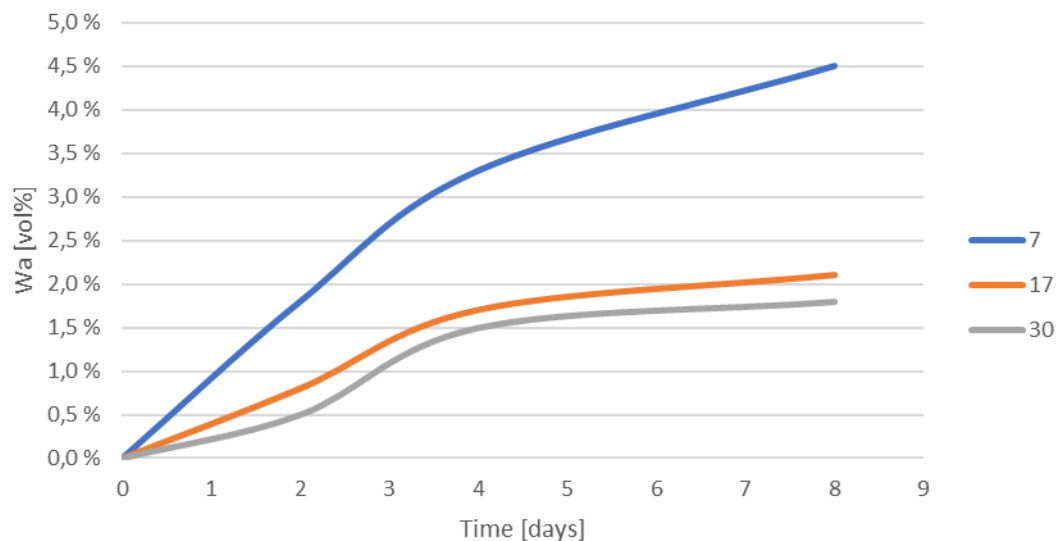


Figure 9: Results from water absorption tests (Johnsen, 2017)

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 Måsevann, 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

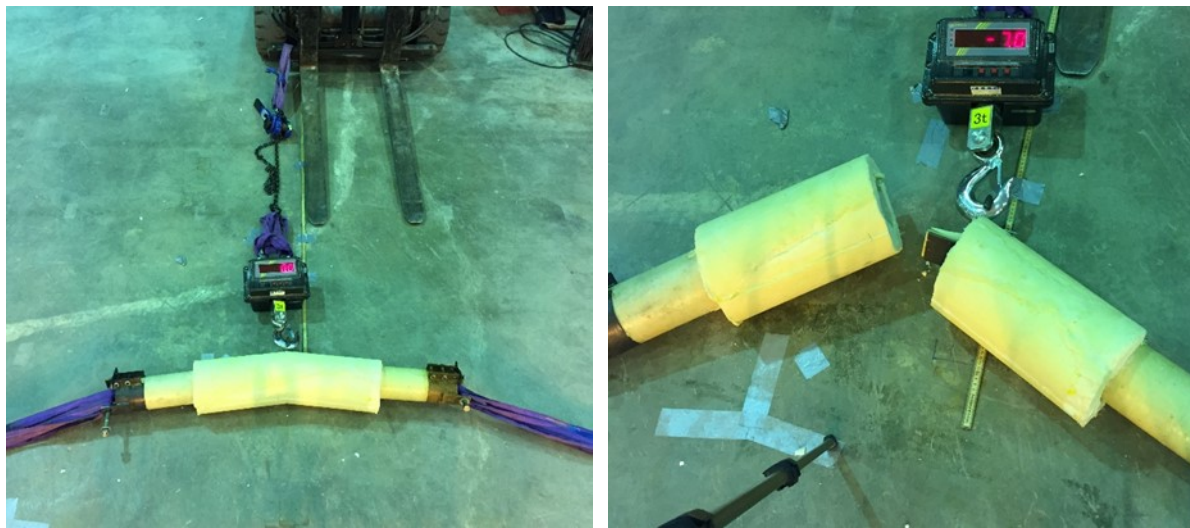
determine the forces acting on the casting boxes. The setup is an easy way to determine the adhesion capacity in the axial direction to the pipe. Table 3 give the main results from the tests.

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.



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.

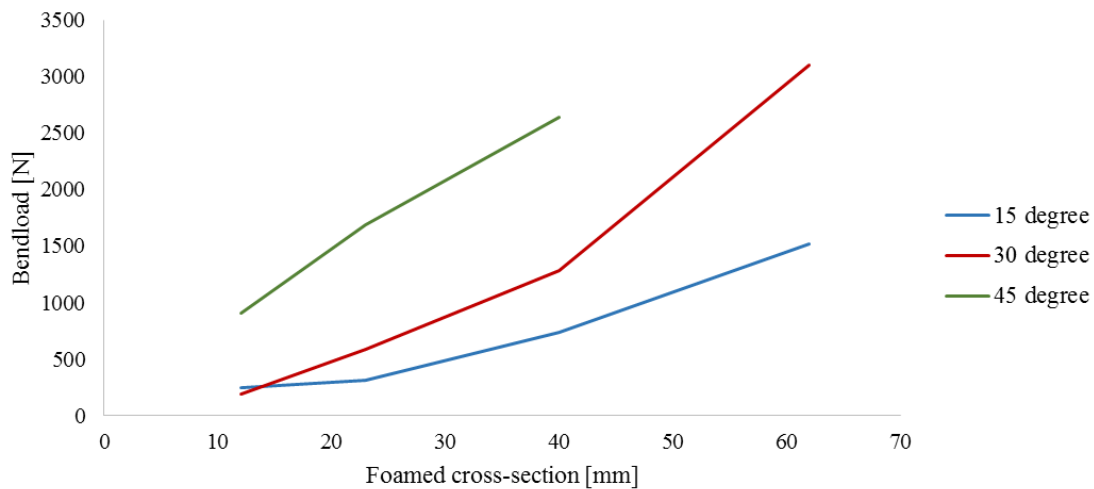


Figure 12: Failure loads in bends anchored with PU-foam (Aaker, 2017)

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 8

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

Forklaring på eget bidrag

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

I forbindelse med masteroppgaven "Legging av rørgater med PU-skum som omfyllingsmasse" ble det utarbeidet en veileder for bruk av PU-skum rundt nedgravde rørgater. I tillegg ble artikkelen "PU-foam in buried penstocks" skrevet i forbindelse med konferansen Hydro 2017, Hydropower & Dams.

Veilederen og artikkelen er, som beskrevet i oppgaveteksten, utviklet i samarbeid med medstudent Stian Løbø Aaker. Oppgaven til Aaker, "Forankring av bend på rørgater med PU-skum", omhandler i hovedsak kraftopptak i bend ved bruk av PU-skum som forankring. Inkludert i oppgaven er også undersøkelser av heftkapasiteten mellom PU-skum og røroverflaten.

Bidraget til veilederen og artikkelen følger en naturlig fordeling.

Veileder:

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

Artikkel:

- Aaker 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.
- Undertegnendes bidrag er erfaringer fra Lille Måsevann pumpestasjon i form av de ulike påføringsmetodene som ble gjennomført. I tillegg har undertegnede bidratt med resultater knyttet til PU-skummetts strekk- og trykkfasthet, samt måling av vannabsorpsjon.
- Resterende bidrag til artikkelen er utarbeidet i samarbeid mellom forfatterne.

Trondheim 2017

Nina Johnsen