



DESIGN AV FREMTIDENS KUMLOKK

William Topper Breien

Produktutvikling og produksjon

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Morten Andre Langøy, IPM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling og materialer

MASTEROPPGAVE 2014
FOR
STUD.TECHN. WILLIAM TOPPER BREIEN

DESIGN AV FREMTIDENS KUMLOKK
New Design of Manhole Cover

Kumlokk er et gammelt industriprodukt. I grunnkonstruksjon har lokket eksistert i snart 100 år. I Norge er det vanlig å bruke jernkvaliteten EN-GJS (seigjern). For å sørge at lokket tåler belastningen, er det vanlig å stive av med en sekskant og vertikale avstivere. Lokkets stivhet og styrke testes etter Norsk standard 1992.

Oppgaven er å designe grunnstruktur for kumlokk som tilfredsstiller belastningskrav og som bruker vesentlig mindre støpejern. Det må være et krav at den skal være formteknisk mulig i et automatanlegg. Er det mulig å forbedre designet og dermed oppnå bedre bruks-egenskaper, mindre materialforbruk og reduserte kostnader?

Oppgavens mål skal oppnås med bruk av FEM-styrkeberegninger, støpesimuleringsverktøy, støpeforsøk og verifikasjonstester. Det å redusere behovet for jern i det ferdige produktet er viktig ut fra et miljøaspekt ved mindre bruk av resurser og bedre HMS, for brukere og produksjonsoperatører, da vekten på lokket kan være en utfordring for dem som skal handtere det ferdige kumlokket. Produktdesignet skal inkludere støpemetode og der redusert støpevekt er viktig. Støpevekt er total vekt av smelte for produksjon av et lokk og består av vekten til matere og løpsystem i tillegg til det ferdige produkt. Samtidig må metoden være robust med hensyn til å unngå eventuelle støpefeil. Dette må eksplisitt gjøres rede for. Forutsetningen for analysen er at materialegenskapene blir oppnådd, i hvilken grad dette kan reflekteres i støpesimuleringen er av interesse.

Senest 3 uker etter oppgavestart skal et A3 ark som illustrerer arbeidet leveres inn. En mal for dette arket finnes på instituttets hjemmeside under menyen masteroppgave (<http://www.ntnu.no/ipm/masteroppgave>). Arket skal også oppdateres en uke før innlevering av masteroppgaven.

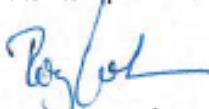
Arbeidet i masteroppgaven skal risikovurderes. Hovedaktiviteter som er kjent/planlagt skal risikovurderes ved oppstart og skjema skal leveres innen 3 uker etter utlevering av oppgavetekst. Alle prosjekt skal vurderes, også de som kun er teoretiske og virtuelle. Skjemaet må signeres av veileder. Risikovurdering er en løpende dokumentasjon og skal gjøres før oppstart av enhver aktivitet som KAN være forbundet med risiko. Kopi av signert risikovurdering skal være inkludert i vedlegg ved levering av rapport

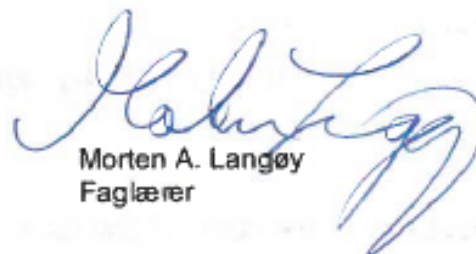
Besvarelsen skal ha med signert oppgavetekst, og redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste,

innholdsfortegnelse, etc. Ved utarbeidelse av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelse legges det stor vekt på at resultater er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Besvarelsen skal leveres i elektronisk format via DAIM, NTNUs system for Digital arkivering og innlevering av masteroppgaver.

Kontaktperson:

for 
Torgeir Welo
Instituttleder


Morten A. Langøy
Faglærer

 **NTNU**
Norges teknisk-
naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling
og materialer

I. Forord

Denne masteroppgaven ble skrevet våren 2014 ved Institutt for Produktutvikling og Materialer (IPM) på NTNU. Den bygger på et forprosjekt som ble gjort høsten 2013, og er vektet med 30 studiepoeng. Problemstillingen er gitt av Ulefos Jernværk og formidlet av NTNU. Jeg har gjennom arbeid med oppgaven og besøk (i oktober 2013 og april 2014) fått sansen for støperifaget og hatt mye moro. Jeg føler jeg har lært mye. Både teoretisk ved litteraturstudie og arbeid med simuleringer, og praktisk ved tilvirkning av modell og støping av kumlokk hos Ulefos.

Jeg vil gjerne takke min veileder Morten Langøy for muligheten til å få jobbe med denne oppgaven, tilrettelegging for støping, veiledning underveis i oppgaven, hyggelige turer til Ulefoss og kurs i Stockholm. Jeg er takknemlig for at du ville dele din kunnskap om støping og metaller med meg.

Takk til Geir Inge Wighus, Thomas Johann Reuter, Embret Arne Mellesmo, Willy Dorholt, Tom Vidar Slåtta og alle de andre hos Ulefos Jernværk for all veiledning og hjelp i forbindelse med støping og testing av lokk. Takk til Bjarne Stolpnessæter for hjelp med tilvirkning av modell, Halvard Støwer for hjelp med lisenser og nettverk og takk til Jonas og Wenche på rom 319 for hyggelig selskap.



William Topper Breien

NTNU, juni 2014

II. Abstract

The objective of this thesis has been to develop a new design for manhole covers. This new design should weigh less. This has been achieved by an iterative design process, analyzing stress in Siemens NX 8, casting simulations in Magmasofts MAGMA5 and casting and testing the new design at Ulefos Jernværks foundry in Ulefoss. This report contains theoretical background and a description of methods used in developing the new design, setting up simulations, creating a model for casting, and the casting of the new design.

The new manhole cover weighs 5.7 kg (11.8 %) less than the old one, and its structure is stiffer. Casting simulations and analysis of stress suggest that it will be able to withstand the loads it has to in order to be certified according to the European standard NS-EN 124.

The results of the simulations, casting and testing of the manhole cover are discussed. Results related to casting and testing of the new design are surprising. The new manhole cover can withstand loads approximately 155 kN higher than expected. The deformation is also lower than assumed. Pictures of the iron's microstructure reveal the reason behind this added strength. The manhole cover's fins consist of a much higher share of pearlite than suggested in simulations in MAGMA5. After studying simulations that reconstruct the conditions when casting manually, it is concluded that the pearlitic microstructure is caused by the circumstances surrounding the inoculation of the melt.

During testing one of the manhole covers was pressed until it developed a crack. This crack appeared in the cover's skirt, not in its fins where the stresses were highest according to analysis. This is explained by the relatively high percentage of cementite in the microstructure of the iron in this part of the casting, combined with stress-concentrating surface irregularities.

III. Sammendrag

Denne oppgavens mål har vært å utvikle et nytt design for kumlokk. Det nye designet skal være lettere enn utgangspunktet. Dette har blitt gjort ved hjelp av en iterativ designprosess, styrkeberegninger i Siemens NX 8, simuleringer av støp i Magmasofts MAGMA5, prøvestøping og testing ved støperiet til Ulefos Jernværk i Ulefoss. Denne rapporten inneholder teoretisk bakgrunn og beskrivelse av metoder tatt i bruk ved utvikling av nytt design, simuleringer, tilvirkning av støpemodell, støping og testing av lokk.

Det nye lokket veier 5.7 kg (11.8 %) mindre enn det gamle, og er stivere. Støpesimuleringer og styrkeberegninger av lokket tilsier at det skal tåle de belastningene det må for å kunne sertifiseres i henhold til den europeiske standarden NS-EN 124.

Resultater av simuleringer, støping og testing av lokk drøftes. Med hensyn til støping og testing av det nye designet er de overaskende. Det nye lokket tåler en belastning på omtrent 155 kN mer enn forventet. Deformasjonen er også lavere enn antatt. Bilder av jernets mikrostruktur avslører årsaken til den økte bæreevnen. Lokkets ribber består av en mye høyere andel perlitt enn det simuleringer i MAGMA5 tilsier. Etter betraktning av simuleringer som rekonstruerer forholdene ved støping på håndforming, konkluderes det med at årsaken til den perlittiske mikrostrukturen er omstendighetene rundt ympingen.

Ved testing ble det ene lokket presset til det utviklet en sprekk. Denne utviklet seg i lokkets skjørt, ikke i ribbene der spenningene i følge analyser var høyest. Utvikling av sprekk begrunnes med at jernets mikrostruktur i dette området har en relativt høy andel sementitt, kombinert med spenningskonsentrerende uregelmessigheter i overflaten.

Innhold

I.	Forord	v
II.	Abstract.....	vi
III.	Sammendrag.....	vii
	Figurliste.....	x
	Tabelliste	xi
1	Innledning	1
1.1	Ulefos historie	1
1.2	Dagens fremgangsmåte	1
1.2.1	Testing i henhold til NS-EN 124.....	1
1.3	Lokkets deler	3
1.4	Målsetning	3
2	Teori.....	5
2.1	Støping	5
2.2	Fasthetslære.....	7
2.3	Elementmetoden.....	9
2.3.1	Statisk elementmetode	9
2.3.2	Varmeledning.....	10
2.3.3	Fluid dynamikk	11
2.4	Støpejern - metallurgi.....	11
2.4.1	Avkjølingshastighet	14
2.4.2	Ymping	14
2.4.3	Legeringselementer.....	15
2.5	Materialmodeller	15
3	Metode	16
3.1	Siemens NX 8.....	16
3.1.1	Oppsett	17
3.1.2	Resultat av analyser av dagens lokk og formvariasjoner	24
3.2	Støpesimuleringer i MAGMA5	28
3.2.1	Geometri.....	28
3.2.2	Materialer, mesh og definisjoner.....	30
3.2.3	MAGMAIron	31

3.3	Nytt design	32
3.3.1	Vekt og geometri.....	32
3.3.2	Spenning	33
3.3.3	Deformasjon	35
3.3.4	Resultater av støpesimuleringer i MAGMA5.....	36
3.4	Tilvirkning av støpemodellell.....	36
3.4.1	Materiale	36
3.4.2	Fremgangsmåte	36
3.5	Støping.....	40
3.6	Testing	43
4	Resultater og diskusjon	45
4.1	Testing av støpte lokk.....	45
4.1.1	Støpesimuleringer i MAGMA5.....	51
4.2	Støpesimuleringer i MAGMA5 - Automatisk produksjon.....	56
4.2.1	Fylling.....	56
4.2.2	Avkjøling og mikrostruktur	57
4.2.3	Feilmodi	60
4.2.4	Shakeout	64
4.3	Vekt.....	67
5	Oppsummering og konklusjon	68
5.1	Videre arbeid.....	69
6	Referanser.....	70
A.	Elementer.....	72
B.	Dynamisk belastning.....	73
C.	Målsatte tegninger	74
D.	Lokkets overside.....	77
E.	Risikovurdering.....	78

Figurliste

Figur 1: Ulefos-ovn. (1)	1
Figur 2: Oversikt over plassering av klasser kumlokk.....	2
Figur 3: Lokkets deler.....	3
Figur 4: Modellplate og sandform med kjerner.....	5
Figur 5: Løpsystemets oppbygning.....	6
Figur 6: Utbøyingen u er en funksjon av x	7
Figur 7: Skisse som gir oversikt over arealtrehetsmoment, eller annet arealmoment. (8)	8
Figur 8: Enkelt bjelkesystem med to elementer.	9
Figur 9: Varmestrøm, hentet fra (9)	10
Figur 10: Bilde av polert og etset seigjern tatt med lysmikroskop. (12)	12
Figur 11: Fe-C fasediagram.	13
Figur 12: Delt mesh ved hjelp av «split face».	17
Figur 13: Modelling av prøvingslast.	18
Figur 14: Oppdeling av mesh.	19
Figur 15: Konvergenstest	20
Figur 16: Et utvalg av flatene som fikk forfinet mesh til 10 mm elementer.....	21
Figur 17: Potensloven og Hookes lov.	22
Figur 18: Oversikt over opplagring	22
Figur 19: Surface-surface glue.....	23
Figur 20: Sammenligning av analyser.	24
Figur 21: Spenningsplott av NSTVL.....	25
Figur 22: Deformasjonene i NSTVL.....	26
Figur 23: Formvariasjoner	27
Figur 24: Oversikt over løpsystem.....	29
Figur 25: Løpsystem tatt i bruk ved håndforming.....	30
Figur 26: NSTVL til venstre og nytt, lettere lokk til høyre.....	32
Figur 27: Elementet med høyest spenning.....	33
Figur 28: Von Mises spenning.	34
Figur 29: Deformasjon	35
Figur 30: Materialegenskaper, Ebaboard 60-1.	36
Figur 31: Oversikt over støpemodelle	37
Figur 32: Spor til pakning i NX.....	38
Figur 33: Modellen til lokkets overside	39
Figur 34: Modellen til lokkets underside limt og ferdig pusset.	39
Figur 35: Knekt sandform.....	40
Figur 36: Løpsystem (t.v.) og overkasse med kjerner(t.h.).....	41
Figur 37: Kuper med smelte.....	41
Figur 38: Støping av polyuretanpakning	42
Figur 39: Testtrigg.	43
Figur 40: Oversikt over kapping	44

Figur 41: Sprekk i lokkets skjørt etter belastning på 550 kN.	45
Figur 42: Spenninger ved belastning på 550 kN.....	46
Figur 43: Oversikt over kapp av lokk studert i mikroskop	47
Figur 44: Prøve 2.....	48
Figur 45: Slip av prøve 3.....	49
Figur 46: Slip av prøve 1.....	50
Figur 47: Ympingens påvirkning på dannelse av perlitt	52
Figur 48: Strekkfasthet.....	53
Figur 49: Sementitt.	54
Figur 50: Sporinger av smeltens bevegelser	55
Figur 51: Illustrasjon av mikrostrukturen ved simulering av nytt lokk og NSTVL.	57
Figur 52: Avkjølingshastigheter.....	58
Figur 53: Spenning i avstiver	59
Figur 54: Størkning av NSTVL	60
Figur 55: Porøsitet i NSTVL.....	61
Figur 56: Størkning av nytt design.....	62
Figur 57: Porøsitet i nytt design.	63
Figur 58: Andelen perlitt etter shakeout ved forskjellige tidspunkter.....	65
Figur 59: Bruddforlengelse i nytt design etter shakeout etter 1800 sek.	66

Tabelliste

Tabell 1: Oversikt over de forskjellige klassenes prøvingslaster.	2
Tabell 2: Lokkets deler	3
Tabell 3: Kjemisk sammensetning av seigjern.	30
Tabell 4: Oversikt over vekt.	67

1 Innledning

Kumlokk brukes til å dekke til sluk for drenering av vann fra fortau og veibane og tilkomst til avløpssystem. Avhengig av plassering må det være mulig å gå eller kjøre oppå lokket. Kumlokket har eksistert i mange år, og har vært under stadig utvikling. I dag stilles det strenge krav til hva lokkene må tåle. Dagens lokk møter disse kravene ved fornuftig bruk av materialer og god utforming av lokkets struktur, men er det potensiale for forbedringer? Ved å redusere lokkets vekt kan norske støperier skaffe seg et fortrinn i konkurransen mot utenlandske aktører. Støperi i Norge vil ha vanskeligheter med å konkurrere mot utenlandske aktører på volum, og er i større grad avhengig av smarte løsninger og innovasjon. Et lettere kumlokk vil gi økonomiske innsparinger og bedre HMS både for produksjonsoperatører og brukere. Mindre bruk av jern er også gunstig med hensyn til miljø.

Ulefos Jernværk, i Ulefoss i Telemark, er et stort norsk støperi. De er en av Norges største leverandører av gategods, og er interessert i å kunne produsere et lettere kumlokk.

1.1 Ulefos historie

Ulefos Jernværk het opprinnelig Holden Jernværk og ble grunnlagt den 8. august 1657. I 1835 ble det kjøpt opp av Diderik Cappelen. Familien Cappelen eier støperiet fortsatt, og det er i dag en av Norges eldste bedrifter. Ulefoss hadde gode forutsetninger for et støperi med tilgang på kull og vannkraft. Støperiet produserte for det meste de berømte Ulefos-ovnene frem til 1952 da gategodset gjorde sitt inntog. Mot slutten av 50-tallet hadde gategodset tatt over. (1)



Figur 1: Ulefos-ovn. (1)

1.2 Dagens fremgangsmåte

Dagens kumlokk støpes hos Ulefos i seigjern på en automatisk produksjonslinje med en kapasitet på 70 lokk i timen. Alle lokk er i henhold til europeisk standard (NS-EN 124 (2)) hvilket innebærer inspeksjon av tredjepart to ganger i året. Alt skrapjern og råjern tatt i bruk i produksjonen er 100 % gjenvinnbart. 97 % av sanden brukt til støpeformer blir gjenvunnet.

Seigjernet (kulegrafittjernet) som tas i bruk av Ulefos ved støping av kumlokk er av typen EN-GJS-500-7 og i henhold til Europastandarden EN 1563:2011 (3). Det har en flytegrense, $R_{p0.2} = 320$ MPa, og en strekkfasthet, $R_m = 500$ MPa. I tillegg til denne høye fastheten er seigjernet mye mer duktilt enn grått støpejern og har gode maskineringssegenskaper.

1.2.1 Testing i henhold til NS-EN 124

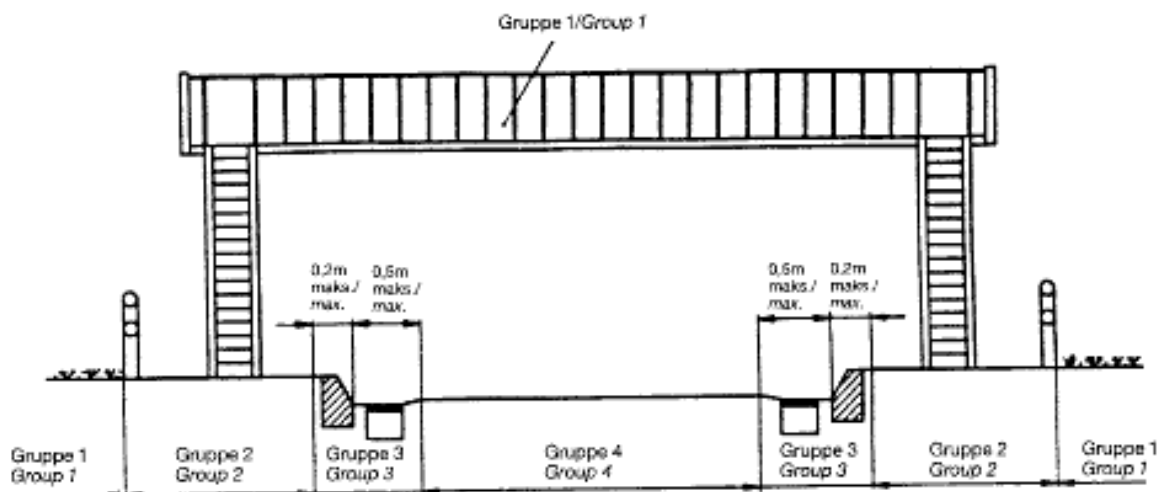
Som nevnt over er alle lokk produsert hos Ulefos i henhold til NS-EN 124, norsk standard for sluktopper og kumtopper. Standarden deler kumlokk inn i 6 forskjellige klasser. Det stilles

forskjellige krav til hvilke belastninger de forskjellige gruppene lokk må tåle. Laster de skal testes med er definert i standardens kapittel 8; Prøving, og fremkommer i tabell 1.

Tabell 1: Oversikt over de forskjellige klassenes prøvingslaster.

Klasse (gruppe)	Prøvingslast [kN]
A 15 (1)	15
B 125 (2)	125
C 250 (3)	250
D 400 (4)	400
E 600 (5)	600
F 900 (6)	900

Figur 2 er hentet fra NS-EN 124 (2, s. 9) og viser hvor de forskjellige klassene kumlokk typisk tas i bruk. Gruppe 5 og 6 er ikke med på figuren. Gruppe 5 brukes i områder utsatt for høye hjullaster, for eksempel kaier. Gruppe 6 brukes der hjullastene defineres som ekstra høye som på flyplasser.



Figur 2: Oversikt over plassering av klasser kumlokk.

Kumlokket som skal videreutvikles i denne oppgaven er av typen D 400 og kalles NSTVL. NS betyr at lokket er sertifisert i henhold til Norsk standard. T betyr at det har pinnesikkert spetthull, V at det har påstøpt pakning og L at det har to låsarmer. Det skal i følge NS-EN 124 testes ved hjelp av en hydraulisk presse med mulighet til å påføre en kraft som er 25 % større enn prøvingslasten. Prøvingsblokkens dimensjoner avgjøres av hvor stor fri åpning lokket som skal testes har. Fri åpning defineres i standarden som «... diameteren til den største sirkelen som kan innskriveres i rammens lysåpning»(2, s.7). NSTVL har fri åpning på 590 mm og skal ha en prøvingsblokk med diameter $d = 250$ mm. Lokket skal ved testing belastes med $2/3$ av prøvingslasten (266.67 kN) fem ganger. Pålastningshastighet skal være mellom en og fem kN/s. Lokket er etter fem ganger belastning med 266.67 kN tillatt en plastisk deformasjon som tilsvarer $\frac{\text{fri åpning}}{300} = 1,98$ mm. Etter den plastiske deformasjonen har blitt målt skal lokket belastes med hele prøvingslasten Etter at

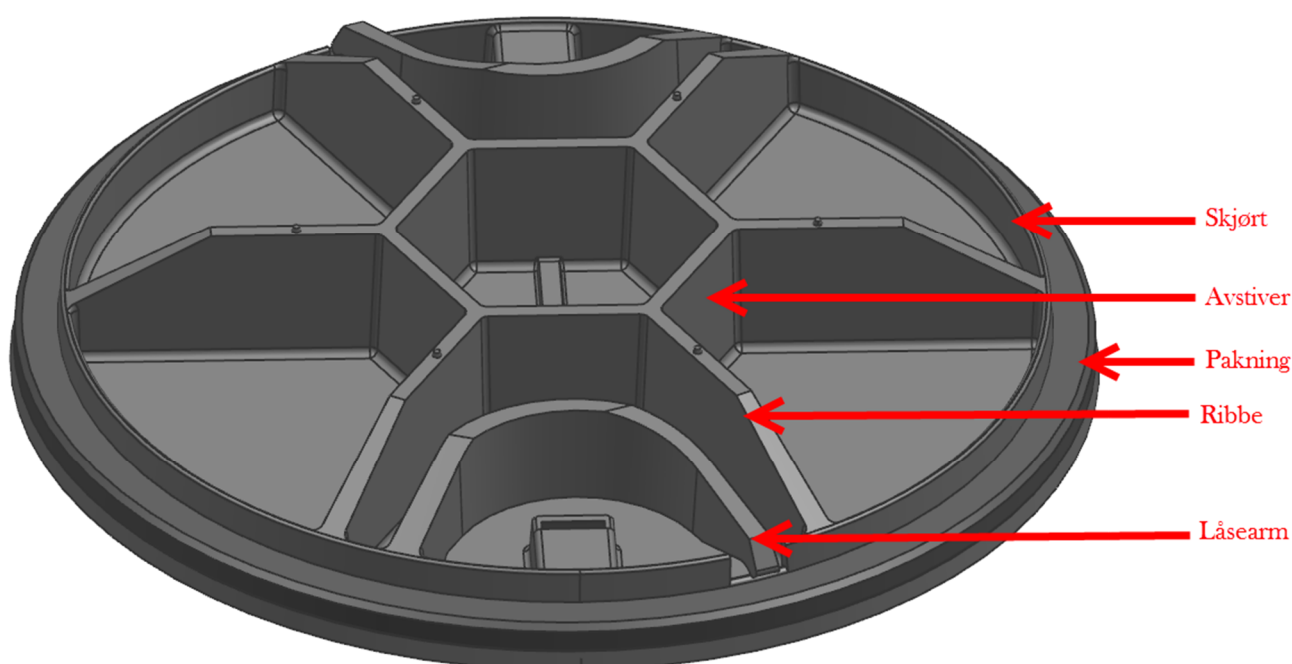
prøvingslasten har blitt påført og holdt i 30 sekunder heter det i standarden at lokket ikke ha noen synlige sprekker. (2)

1.3 Lokkets deler

Kumlokkene omtalt i denne oppgaven har deler som er navngitt og definert som vist i Tabell 2 og Figur 3. Med «underside» menes siden vendt ned mot kummen.

Tabell 2: Lokkets deler

Navn	Beskrivelse
Skjørt	Lokkets skjørt avgrenser anleggsflata (flata der undersiden av lokket hviler mot rammen).
Avstiver	Avstivende struktur i midten av lokkets underside.
Pakning	Pakning av polyuretan som ligger på anleggsflaten mellom lokk og ramme på undersiden av lokket langs dets ytterkant.
Ribbe	Avstivende struktur på lokkets underside. Radielt orientert mellom avstiver og skjørt.
Låsearm	Anordning som låser lokket til ramma.



Figur 3: Lokkets deler

1.4 Målsetning

Hovedmålsettingen for oppgaven er ved hjelp av styrkeberegninger i Siemens NX 8, støpesimuleringer i Magmasofts MAGMA5 (begge programvare som benytter FEM) og en iterativ designprosess å redusere vekten til kumlokket så mye som mulig. Vektreduksjon er ikke bare gunstig i alle ledd i produksjonen, men det vil også gi økonomiske innsparinger og forbedre HMS. Vektreduksjon er også gunstig om man ser på andre faser i kumlokkets levetid enn produksjon. Lavere vekt kan bidra til lavere kostnader og utslipp ved transport og HMS ved bruk. Lökkene

denne rapporten tar for seg er utstyrt med en låsemekanisme, så redusert vekt vil ikke kunne føre til at lokket spretter opp eller at uønskede brukere får det ut av ramma.

En annen målsetning er at det nye designet skal kunne støpes uten kjerner (bortsett fra for spetthull og låsearm). Dette er av hensyn til effektiv produksjon, da kjerner kompliserer støpeprosessen. Dersom bruken av kjerner forsvares, er det greit å ha dem med i forslag til nytt design.

Prosjektets tredje målsetning er å få gjort prøvestøp av nytt lokk. Ulefos har sagt seg villig til å stille støperi til disposisjon og å veilede ved støping. Støpeform kan freses ut i prototypelab ved NTNU og fraktes til anlegget. Det er også mulighet for å få testet det nye kumlokket i henhold til NS-EN 124 i laboratoriet der.

Målsetninger med hensyn til reduksjon av støpevekt (summen av lokkets, løpsystemets og eventuelle materes vekt) ved å utarbeide nytt design av løpsystem har blitt nedprioritert og Ulefos sine løpsystem har blitt brukt i alle simuleringer og ved støping av lokk. Utvikling av lokkets nye design og prøvestøping av dette har blitt prioritert. Begrensningen av arbeidet med løpsystemet var nødvendig for å få gjennomført støpingen.

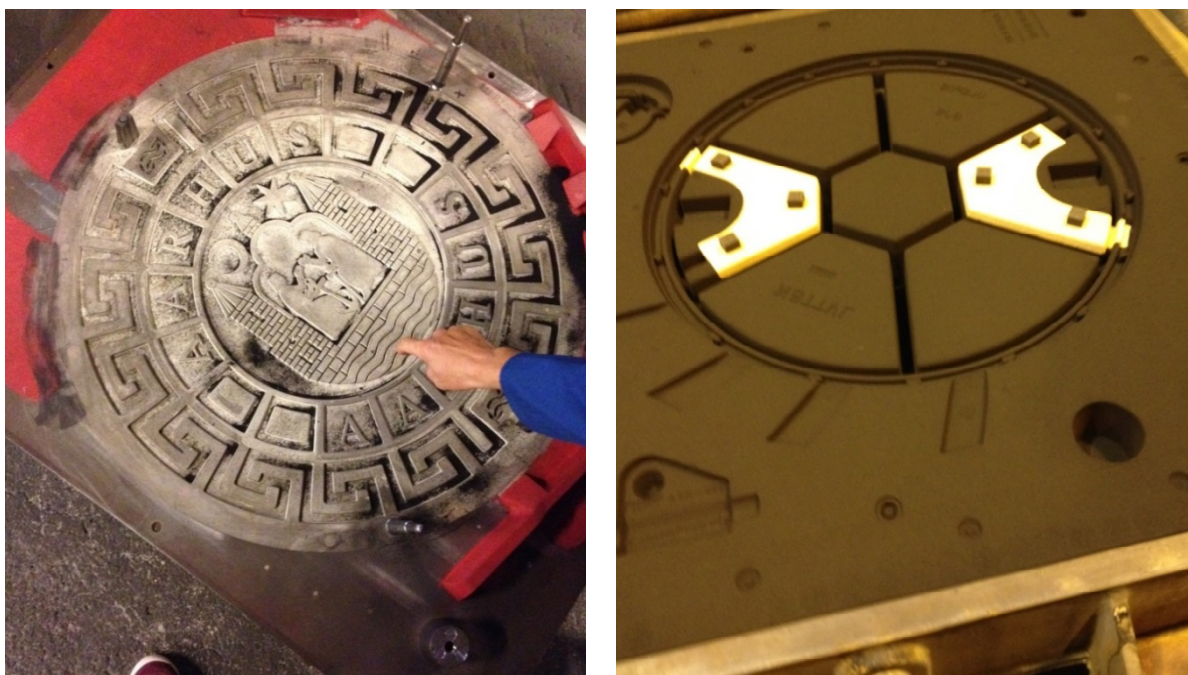
Utvikling av nytt design av låsemekanisme har også blitt nedprioritert, selv om det også her antas å være potensiale for innsparing av vekt. Utvikling av ny låsemekanisme vil avhenge av ikkelineære analyser og utmattingsberegninger og vil være en tidkrevende prosess.

2 Teori

2.1 Støping

Denne rapporten vil ta for seg sandstøping. Ved sandstøping lages støpeformen av sand og brukes kun en gang. Sanda er lett å forme og har termiske og mekaniske egenskaper som gjør at den tåler belastningene den blir utsatt for ved fylling av form og håndtering. Det finnes forskjellige typer sand man kan ta i bruk, og alle bortsett fra råsand tilsettes et bindemiddel med herder som gjør at sanda holder formen. Ved støping av kumlukk hos Ulefos er det (med unntak av kjerner) råsand som tas i bruk. Sanden resirkuleres etter prosessen er ferdig. Navnet råsand kommer av at vannet som brukes ved formingen av sanda beholdes ved støping.

Formen kan enten lages delt eller udelt. Ved masseproduksjon av kumlukk blir formemaskiner som hurtig lager mange delte former tatt i bruk. Formene er enkltsidige. Det vil si at det er en modell for oversiden av parteplanet og en modell for nedsiden. Figur 4 viser en modellplate brukt ved masseproduksjon av delte sandformer. Denne platen hører til parteplanets overside. Den blir klemmt oppunder formkassa, og formkassa blir fylt med sand. Sanden presses så sammen og mot modellplata ved hjelp av en hydraulisk sylinder (900 kN). Kjerner er sandformer som benyttes for å bevare hulrom i støpet der man vil ha det. De formes i separat prosess og plasseres i formen. Til høyre på Figur 4 kan kjernene som sørger for mellomrommet mellom låsearmen og kumlukkets underside tydelig sees. Kjernene er formet av en finere sand og tilsatt bindemiddel og herder. De hvite sandformene på figuren er kjerner.

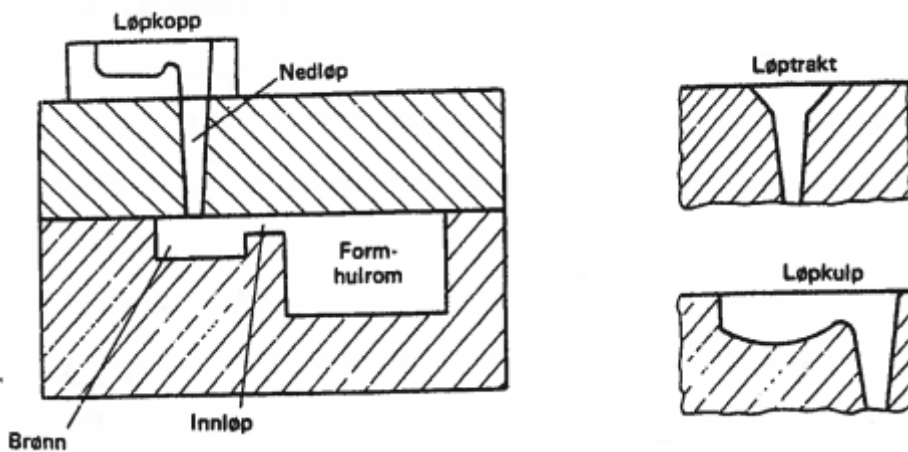


Figur 4: Modellplate og sandform med kjerner.

Ved utforming av både kjerner og modell er det viktig å sørge for å ha høy nok slippvinkel slik at sanda ikke henger fast i modellen når den fjernes. Etter plassering av kjerner snus oversideformen og plasseres oppå undersideformen. Styrepinner sørger for at formens deler er plassert korrekt i

forhold til hverandre (forhindrer *partforskyvning*). Hele løpsystemet er med på modellplatene, så etter at overdel og underdel er forenet er formen klar for helling.

Hvilken måte formen fylles med smelt på er avgjørende for hvordan resultatet blir. Det finnes en rekke feil som kan oppstå om formfyllingen ikke skjer på en tilfredsstillende måte; Inneslutninger, utilstrekkelig etterfylling som fører til sugninger eller lunkere (hulrom mellom gods og støpeform), gassporer, og erosjon av form og kjerner som fører til inneslutninger av sand. Et godt designet løpsystem er viktig for å forhindre disse feilene. Et enkelt løpsystem består av løptrakt/løpkulp, nedløp, horisontalt løp og innløp. Figur 5 illustrerer løpsystemets oppbygning. Løpsystemet kan også ha brønn. Brønnens tenkte funksjon er å samle slagg. I noen tilfeller vil den i stedet føre til innrøring av oksyder og dårlig gods, så om brønn skal benyttes eller ikke bør vurderes i forhold til støpet. Figuren er hentet fra (4, s. 34). Nedløpet er konisk med en større diameter i toppen. Dette er for å forhindre aspirasjon fra sandformen inn i støpets hulrom. I noen løpsystem tas det i bruk filter. Disse forhindrer slagg eller urenheter fra kupen å komme ned i formen og sørger for at smelten strømmer jevnt.



Figur 5: Løpsystemets oppbygning.

Avhengig av materiale og geometri kan støpet ha behov for mating. Innløpene vil i mange tilfeller størkne før mye av støpegodset. Dette forhindrer mating fra løpsystemet. Materne ettermater smelt og skal kompensere for størkningskrymp (krymping ved kjøling fra temperatur ved helling til smeltetemperatur) i materialet. Ved dimensjonering av mater er materens *modul* sentral, da det er viktig at materen størkner etter resten av støpet. Det er vanlig å isolere matere med et eksotermisk materiale (materiale som avgir varme) som sørger for dette.

$$\text{Modul, } M = \frac{V}{A} \quad (1)$$

V er støpets volum, og A er arealet av overflaten som ligger mot formen.

$$V_m = 1.2 * V_s \quad (2)$$

Dersom materens modul V_m er 1.2 ganger så stor som støpets modul V_s er det ikke nødvendig å isolere materen i særlig grad.

Porøsitet i støpegodset er en feilmodus som bør tas hensyn til, da det reduserer mekaniske egenskaper. Porøsitet kan komme av størkningskrymp og dårlig mating, eller at smelten skiller ut gass når temperaturen synker. En annen feilmodus er varmesprekker. Smelten krymper når den størkner og spenninger kan oppstå da deler av støpet holdes igjen av formen. Der dette skjer og materialet enda ikke er fullstendig størknet kan varmesprekker oppstå. Liten kornstørrelse og lite størkningsintervall bidrar til å minimere varmsprekking.

Kaldflyt er en feilmode som forårsakes av for lav støpetemperatur eller for tynt gods. Den kan føre til at støpet får en rillet overflate. Smelten størkner delvis før formen er fullstendig fylt.

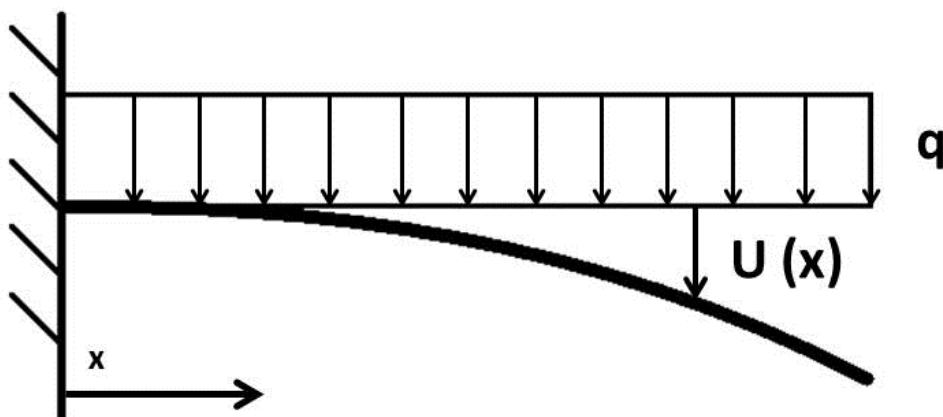
Støpegodsets form (spesielt med hensyn til godstykkelser), smeltens temperatur ved helling, legeringselementer, sandas termiske egenskaper og forskjellige former for kjøling av støp er alle eksempler på ting som virker inn på det ferdige støpets mikrostruktur. Mikrostrukturen er avgjørende for hva slags mekaniske egenskaper det endelige produktet har. (4, 5)

2.2 Fasthetslære

I et forsøk på å forenkle problemet og forstå hvordan kumlokket bøyes, og hvilke parametere som avgjør hvilken måte dette skjer på, betraktes ribbene som bjelker.

Differensiallikningen for den elastiske linje, eller Euler – Bernoulli-formelen (6, kap. 19), beskriver forholdet mellom påført moment og følgende utbøying av en bjelke.

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (3)$$



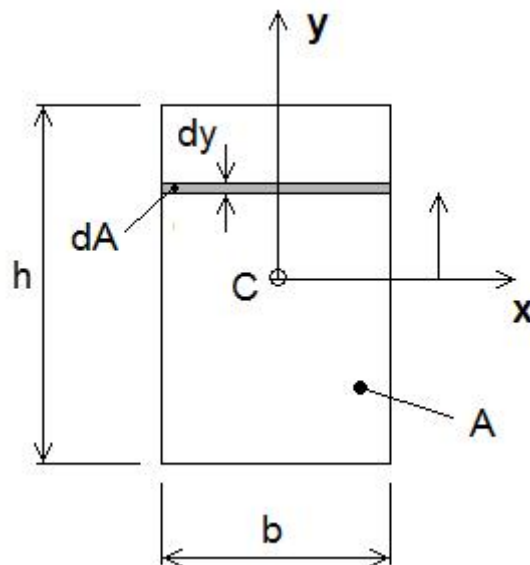
Figur 6: Utbøyingen u er en funksjon av x .

Kombineres denne med bjelkens differensiallikning,

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = -q(x) \quad (4)$$

blir resultatet en 4. ordens differensiallikning som beskriver forholdet mellom utbøyning og påført last, så lenge bjelkestivheten EI er konstant. (6, 7)

$$\frac{d^4 u}{dx^4} = \frac{q(x)}{EI} \quad (5)$$



Figur 7: Skisse som gir oversikt over arealtrehetsmoment, eller annet arealmoment. (8)

Elastisitetsmodulen E avhenger av materialet, mens arealtrehetsmomentet I avhenger av geometrien. Den generelle formelen for arealtrehetsmoment:

$$I = \int_{-h/2}^{h/2} y^2 b dy \quad (6)$$

Arealtrøghetsmomentet forteller oss om et tverrsnitts evne til å motstå utbøyning om en akse (x -aksen i figuren over). Det vil si at hvis utbøyning er dimensjonerende, bør man sørge for at arealtrehetsmomentet om den aksene utbøyningen skjer er så høyt som mulig. (6, 8)

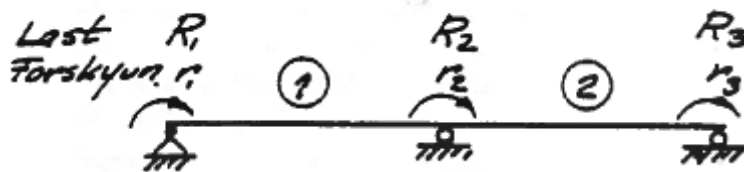
2.3 Elementmetoden

2.3.1 Statisk elementmetode

Elementmetoden er en veldig kraftig numerisk metode som er meget godt egnet for bruk i datamaskin. I innledningen i kompendiet (9) han har forfattet som omhandler elementmetoden skriver Waløen:

Elementmetoden går i prinsipp ut på at den aktuelle konstruksjonen deles opp i en rekke elementer. Stivheten av hvert element beregnes, dvs. en beregner hvilke krefter som må påføres elementet for å få visse enhetsdeformasjoner. Deretter settes elementene sammen og forbindes med hverandre i såkalte knutepunkter slik at de til sammen danner det aktuelle systemet. Ved å addere elementenes stivheter på en logisk måte, kan en finne systemets stivhet, dvs. hvilke krefter som må påføres i knutepunktene for å oppnå enhetsforskyvninger i hvert enkelt knutepunkt. Likevektslikningene for hvert enkelt knutepunkt gir et ligningssystem med knutepunktforskyvninger som ukjente. Dette ligningssystemet løses. Dermed er deformasjonen av hvert element kjent, og snittkrefter eller spenninger i elementet kan beregnes. (9, s. 15)

Figur 8 er hentet fra (9) og viser et enkelt bjelkesystem sammensatt av to elementer. Knutepunktene last – og forskyvningsvektorer er også markert på figuren.



Figur 8: Enkelt bjelkesystem med to elementer.

Lastene på systemet kan uttrykkes ved systemets stivhetsmatrise, K , og forskyvningsvektorene, r .

$$Kr = R \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Systemets stivhetsmatrise settes sammen av elementenes stivhetsmatriser, k_{ij} . Disse finnes ved å betrakte hvordan elementet er opplagret og hva slags stavendekrefter, S , det utsettes for. Deretter leses de ut av tabell. Stavendeforskyvningene, v , er enhetsforskyvninger.

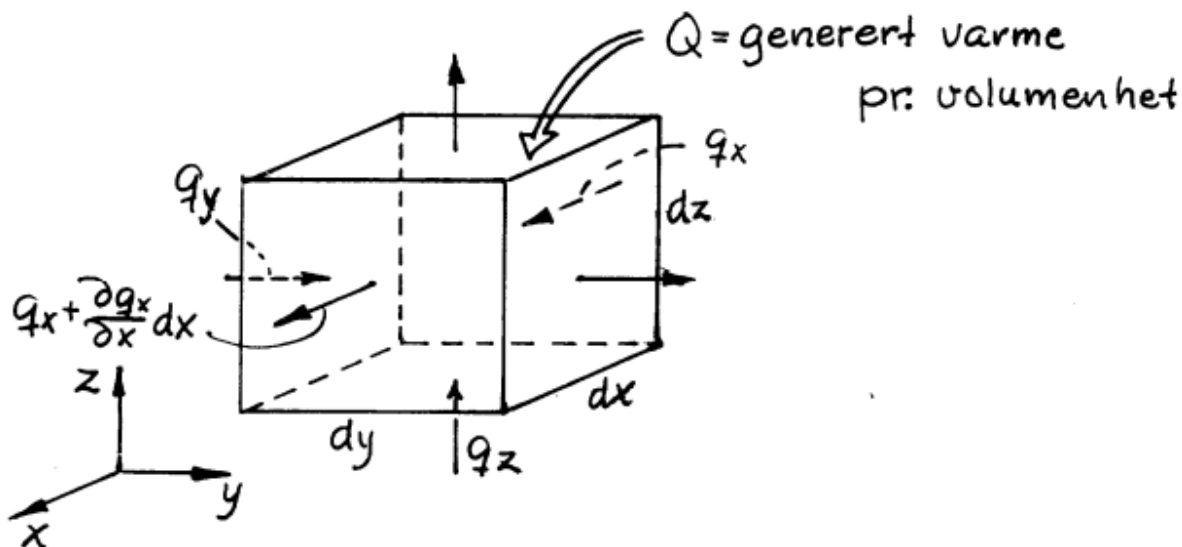
$$S = kv \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

(9)

2.3.2 Varmeledning

Elementmetoden har mange forskjellige bruksområder og brukes av MAGMA5 til å beregne varmeledning i tredimensjonale elementer.



Figur 9: Varmestrøm, hentet fra (9)

- q_x = varmemstrøm pr. flateenhet i x-retning
- q_y = varmemstrøm pr. flateenhet i y-retning
- q_z = varmemstrøm pr. flateenhet i z-retning

Trekker man varmen som avgis fra varmen som tilføres elementet og eventuell varme det genererer får man elementets økning av varmeinnhold.

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + Q = c\rho\dot{T} \quad (11)$$

c er varmekapasitet og \dot{T} er endring i temperatur per tidsenhet. Etter eventuell anisotropi i varmeledningsevne og grensebetingelser er tathensyn til kan uttrykket settes opp på matriseform ved hjelp av temperaturvektoren \mathbf{a} .

$$\mathbf{H}\mathbf{a} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{a}} = \mathbf{R} \quad (12)$$

\mathbf{H} er varmeledningsmatrisen, \mathbf{C} er kapasitetsmatrisen og \mathbf{R} er varmemstrømsvektoren.(9)

2.3.3 Fluid dynamikk

MAGMA5 bruker også elementmetoden til å simulere væskestrømning ved fylling av støpeform. Konservering av masse, moment og energi gjennom et element er sentralt her. Konservering av masse beskrives ved

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (13)$$

ρ er massetettheten og det må være balanse mellom massestrømmen ρu_i og endringen i massetetthet per tidsenhet. u , v og w er elementets lokale akser. For konservering av moment må det være balanse mellom momenter som kommer inn eller går ut av elementet, spenninger i elementet og kreftene ρf_i det er belastet med. p er trykket.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) - \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} - \rho f_x = 0 \quad (14)$$

Konservering av energi beskrives ved ligningen

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} u_{ij}) - \rho f_i u_i - q_H = 0 \quad (15)$$

der E er summen av den kinetiske energien og væskens indre energi, som er en funksjon av trykk og temperatur $E = e(T, p) + \frac{u_i u_j}{2}$. H er elementets entalpi. q er varmen avgitt av elementet og defineres ved hjelp av elementets varmeledningskoeffisient, k . Navier-Stokes ligning kombinerer ligningene (13), (14) og (15)

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \mathbf{G}_i}{\partial x_i} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (16)$$

\mathbf{U} er en vektor som beskriver masseendring ved hjelp av ligning (13). \mathbf{F} beskriver momentbalanse ved hjelp av ligning (14), \mathbf{G} beskriver konservering av energi og \mathbf{Q} beskriver grensebetingelser. Begge sistnevnte ved hjelp av ligning (15). (10)

2.4 Støpejern - metallurgi

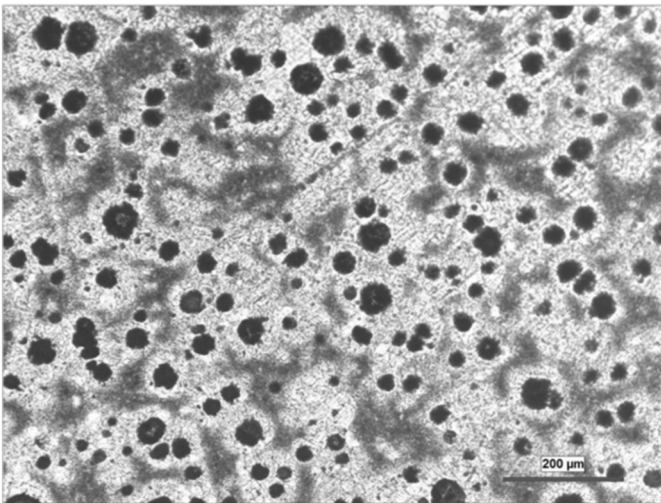
Støpejern defineres som alle jern-karbon-legeringer med mer enn 2 % karbon (2.5 – 3.8 %). Alle støpejern inneholder silisium. De kan deles inn i fem hovedgrupper:

1. Grått støpejern
2. Seigjern
3. Kompaktgrafittjern
4. Hvitt støpejern
5. Aduserjern

Ved størkning av støpejern kan karbonet danne to forskjellige strukturer. Det kan være bundet som jern-sementitt ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ - hvitt støpejern), eller være fritt som jern-grafitt (Fe-C - grått støpejern). Støpejernet ekspanderer ved dannelse av fri grafitt. Dette fører til at man ofte ikke trenger mating i særlig grad, noe som forenkler støpeprosessen, minker behov for maskinering etter støp og kan gi innsparinger økonomisk. Jern-sementitten er uønsket da den er ustabil og ikke fører til noen ekspansjon ved størkning. Høye andeler sementitt, eller karbider, er heller ikke ønsket. Den er veldig sprø, og kan ikke maskineres. Aduserjern fremstilles ved adusering (gløding) av hvitt støpejern.

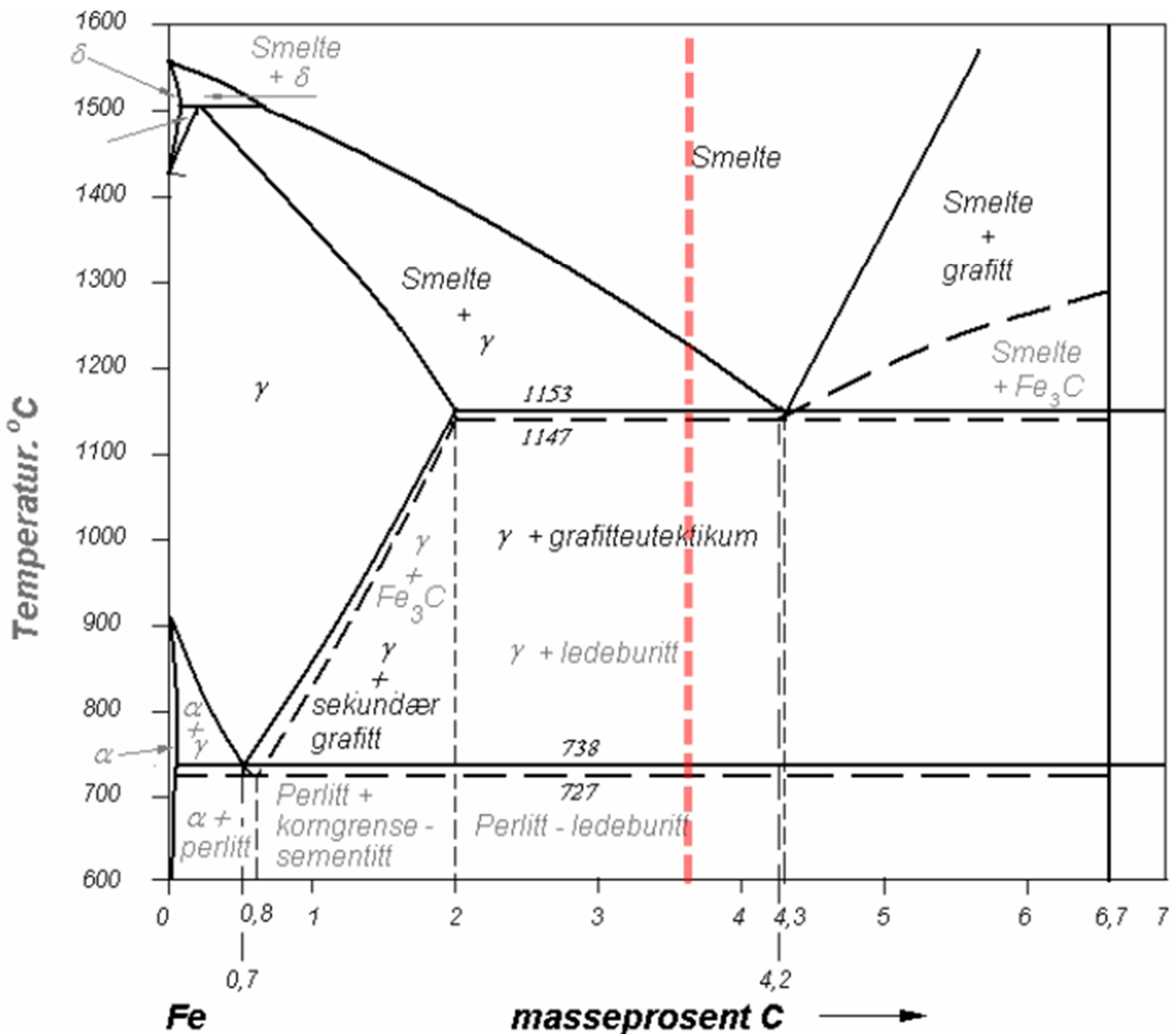
Seigjern får sin gode duktilitet blant annet ved gjennomgang av en spesiell smeltebehandlingsprosess. Smelten helles over i en behandlingsøse der den tilsettes en jernlegering (FeSiMg) med 0.08 % Mg (av smeltens masse). Magnesiumet får reagere med smelten og etter kort tid er innholdet Mg redusert til 0.04 %. Magnesiumet gjør at grafitten utskilles i kuleform, i stedet for som flak. Det er dette som gjør seigjernet så mye mer duktilt enn grått støpejern. Seigjern har høy fasthet, og omtrent like maskineringsegenskaper som grått støpejern. Det har noe dårligere varmeledningsevne. Støpbarheten til seigjern er litt lavere enn den hos grått støpejern, men den er langt bedre enn stål. (4, 11)

Figur 10 viser et bilde av polert og etsset seigjern tatt med lysmikroskop. Det svarte er grafitt i kuleform, typisk for seigjern.



Figur 10: Bilde av polert og etsset seigjern tatt med lysmikroskop. (12)

Jernets mekaniske egenskaper avhenger i stor grad av hva slags mikrostruktur det har. Denne strukturen påvirkes igjen av en rekke faktorer. De mest interessante i denne sammenheng er avkjølingshastighet, behandling av smelte og legeringselementer. Fasediagram illustrerer forskjellige metallers løselighet i hverandre ved forskjellige temperaturer. De gir en god oversikt over hva slags mikrostruktur man kan forvente å finne i en kjent legering. Fe-C fasediagrammet (**Figur 11**) viser hvor mye karbon som er løselig i jern ved forskjellige temperaturer, og hvilke mikrostrukturer forskjellige andeler karbon og temperaturer resulterer i. Andelen karbon i jernet som tas i bruk under arbeid med denne oppgaven er markert på figuren. γ -fase er austenitt. Ledeburitt er eutektikumet i Fe-C og består av austenitt og sementitt. Sementitt er et jernkarbid, Fe_3C . α -fase er ferritt. (11)



Figur 11: Fe-C fasediagram.

Det er tre mikrostrukturer i Fe-C diagrammet som er spesielt interessante i denne sammenheng:

- **Austenitt**

Austenitt i jern er termodynamisk stabilt kun ved temperaturer på 727 °C og oppover. Austenitten er kubisk flatesentrert (fcc) og kan løse opp til 2 % karbon.

- **Ferritt**

Når seigjern (med vektprosent karbon på om lag 3 %) avkjøles vil det ved 727 °C begynne å danne seg ferritt. Krystallstrukturen går da over fra å være kubisk flatesentrert til å bli kubisk romsentrert (bcc), og det er plass til mindre karbon i gitteret. Ferritt er mykt, duktilt og har gode maskineringssegenskaper.

- **Perlitt**

En perlittisk mikrostruktur består av ferritt og sementitt. Ferritten vokser på grensa til grafittnodulene. Sementitten blir liggende mellom ferrittkorna. Perlitt er hardt og stivt sammenlignet med ferritt. Det har høyere styrke og omtrent like maskineringssegenskaper.

2.4.1 Avkjølingshastighet

Som nevnt over vil krystallstrukturen ved 727 °C endre seg fra fcc til bcc og løseligheten til karbon i strukturen går ned. Karbonet diffunderer inn til grafittnodulene. Dette fører til en undermetning av karbon i området rundt disse og gjør det mulig for ferritten å vokse. Den formes langs karbonnodulenes grenser. Når nodulene er helt omringet av ferritt må karbonet diffundere gjennom ferritten. Karbonet som ikke har diffundert ut av austenitten og inn til nukleidene når temperaturen synker under 727 °C vil bli til sementitt mellom ferrittkorna. Hvis man er ute etter en mikrostruktur med høye andeler ferritt er det derfor viktig å sørge for at avkjølingshastigheten ved 727 °C holdes nede. Høye avkjølingshastigheter kan føre til høye andeler sementitt og sprøtt materiale, spesielt der godset er tynt

2.4.2 Ymping

Støpejernets størkning og hvilken mikrostruktur som utvikles manipuleres blant annet ved hjelp av en prosess som kalles *ymping* (inokulering). Et ympemiddel tilsettes smelten rett før eller under støping, gjerne rett i strålen ved overføring fra smelteovn til øse. Ympemiddelet består vanligvis av legeringer av jern og silisium eller finknust grafitt. Finknust grafitt er det mest effektive. Ympemiddelet tilfører smelten et stort antall krystallisasjonskjerne, og øker tettheten grafittnoduler (i seigjern, grafittflak i andre jern) drastisk. Dette fører til en mer finkornet og mer ensartet struktur, og legger til rette for dannelse av en mikrostruktur med høye andeler ferritt. Ympingen minker dannelsen av sementitt. Når ympemiddelet tilsettes er avgjørende for hvilken effekt det har. Ymping er mer effektivt jo lavere karbonekvivalenten i jernet er og har nesten ingen virkning i overeutektiske jern (4, 11, 13)

2.4.3 Legeringselementer

Karbon påvirker flytbarheten til smelten og hvor mye den krymper. Begge disse må tas hensyn til ved design. Karbon påvirker også antallet og størrelsen på grafittpartikler som skilles ut ved størkning. Dette vil påvirke dannelsen av ferritt. Silisium er grafittiserende og fører til høye andeler ferritt. Dette fører igjen til et mer duktilt jern med litt høyere flytegrense. Strekkfasthet og hardhet går ned. Mangan fører til økte andeler perlitt og øker strekkfasthet mens duktilitet minkes. Nikkel øker styrken ved å bidra til finkornet perlitt. Kobber bidrar også til vekst av perlitt. Molybden sørger for at mikrostrukturen holder seg mer stabil ved høye temperaturer. Det kan sørge for at styrken i noen typer jern beholdes opp til temperaturer på omtrent 650°C. Svovel er ikke ønsket i seigjern da det binder seg med manganet og på denne måten svekker dannelsen av den ønskede kulegrafitten. Fosfor blir sett på som forurensning i jernet og bidrar til sprøhet. (14, 15)

2.5 Materialmodeller

Materialmodeller beskriver forhold mellom tøyning og spenning i et materiale. Hookes lov er en lineær funksjon og blir brukt til å beskrive hvordan et materiale tøyres elastisk.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (17)$$

Utsettes materiale for belastninger som fører til spenninger over flytegrensa vil forholdet mellom tøyning og spenning ikke lenger være lineært, og Hookes lov vil ikke beskrive det på noen god måte. Det finnes mange forskjellige måter å beskrive et materiale som deformerer plastisk på. En av dem er potensloven.

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (18)$$

K er en styrkekoefisient og n er en fastningsekspONENT. Begge er konstanter og varierer fra materiale til materiale.(16)

3 Metode

3.1 Siemens NX 8

Siemens NX 8 er programvare som benytter elementmetoden, og kan gjøre en rekke forskjellige analyser. Det har blitt tatt i bruk ved styrkeberegninger av NSTVL og nye design. Ved styrkeberegninger som den som har blitt gjort her finnes det to forskjellige typer analyser en kan ta i bruk. Den statisk lineære analysen er den raskeste og minst krevende (med hensyn til datakraft). Den statisk ikkelineære analysen krever mer datakraft og tar lenger tid, men vil i mange tilfeller gi mer fornuftige resultater. I oppgavens designfase ble det gjort mange analyser av forskjellige lokk, og det ville vært veldig tidkrevende å gjøre ikkelineære analyser. Derfor ble det tidlig i prosjektet undersøkt i hvilken grad en lineær tilnærming ville gi korrekte resultater. Ved statisk lineær tilnærming er det tre hensyn som må tas:

1. Materialet

Materialet vil ved en statisk lineær tilnærming betraktes av NX som lineært elastisk og forholdet mellom spenninger og tøyninger beskrives lineært ved hjelp av Hookes lov beskrevet ved ligning (13)

Ved ikkelineære analyser endres stivhetsmatrisen til elementene og modellen etter hvert som deformasjonen går plastisk. Ny stivhetsmatrise må settes opp, og nye ligningssett med denne må løses. I hvilken grad plastiske deformasjoner gjør seg gjeldende vil være avgjørende for om en lineær tilnærming gir gode resultater eller ikke.

2. Geometri

Geometrien til en komponent vil i mange tilfeller kunne bidra til økt stivhet. Materiale i områder rundt lokale deformasjoner vil kunne holde igjen deformasjonen. (16, s. 110) Denne typen avstiving er det vanskelig å kartlegge, og man bør gjøre en ikkelineær analyse og sammenligne deformasjon i områder av interesse.

3. Grensebetingelser

Skal en statisk lineær tilnærming gi gode resultater kan ikke modellens grensebetingelser endre seg etter hvert som laster påføres. Opplagringer og kontaktflater må være de samme før pålastning som etter, og lastene må påføres med konstant størrelse, fordeling og orientering. (17)

Simuleringene antas å påvirkes av plastiske deformasjoner i veldig liten grad, og det er svært små eller ingen endringer i opplagring og kontaktflater. Statisk lineære tilnærminger ble antatt å gi gode resultater. Allikevel ble det gjort en sammenligning av en statisk lineær og en statisk ikkelineær analyse.

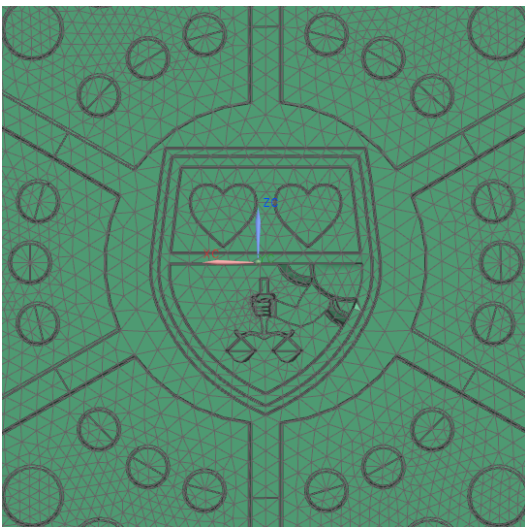
3.1.1 Oppsett

3.1.1.1 Modellering av belastninger

Statisk lineær analyse

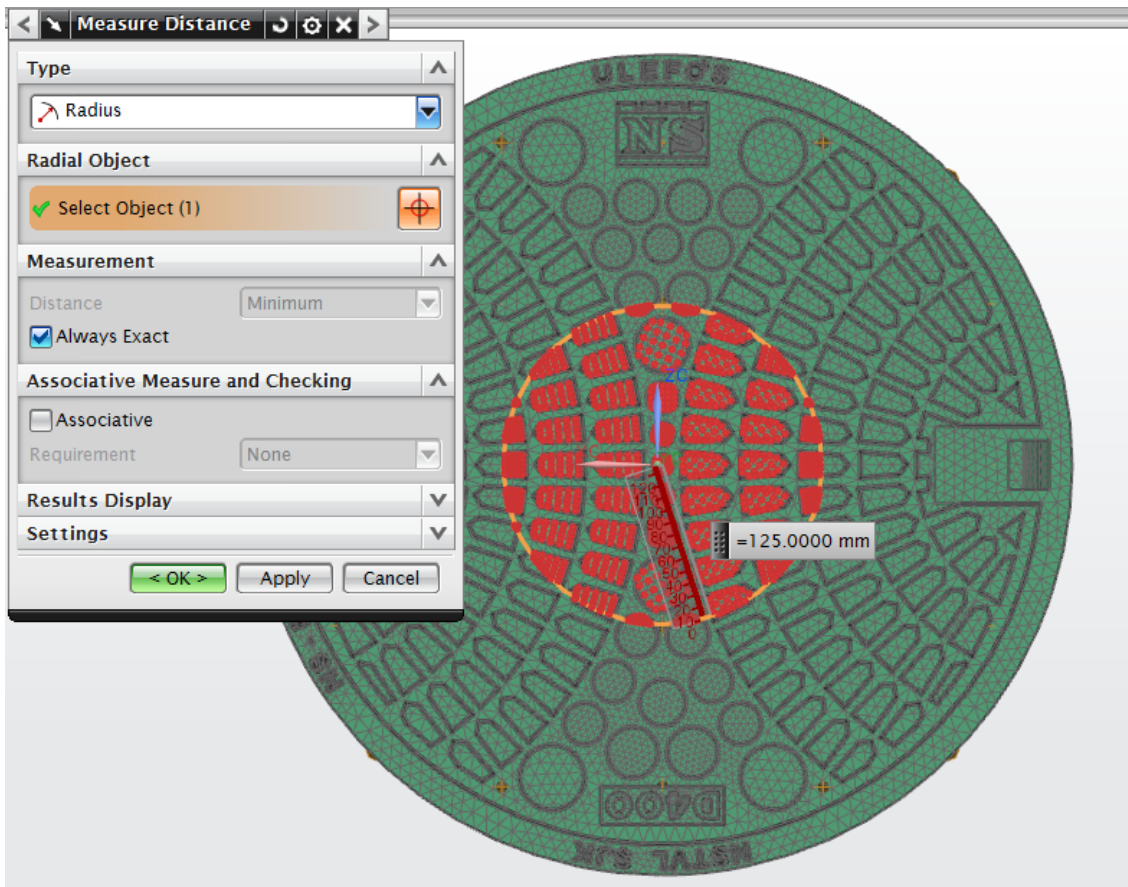
Lokk av klassen D400 skal ifølge NS-EN 124 (2, s. 17) prøves med laster på 400 kN og 266.67 kN som beskrevet i denne rapportens kapittel 1.2.1. Disse lastene skal påføres ved hjelp av en prøvingsblokk med en diameter på 250 mm. Prøvingsblokkens geometriske sentrum skal sammenfalle med kumlokkets. Figur 13 viser hvordan prøvingslasten er modellert i NX. Lastene modelleres som fordelte belastninger over prøveblokkens flate.

Meshet på oversiden ble delt opp ved hjelp av «split face» som vist på Figur 12, slik at lasten kunne modelleres riktig



Figur 12: Delt mesh ved hjelp av «split face».

Figur 13 viser hvordan prøvingslasten er modellert. Den er fordelt utover et sirkelformet område med en diameter på 250 mm. Dette områdets sentrum sammenfaller med lokkets.



Figur 13: Modellering av prøvingslast.

Statisk ikkelineær analyse

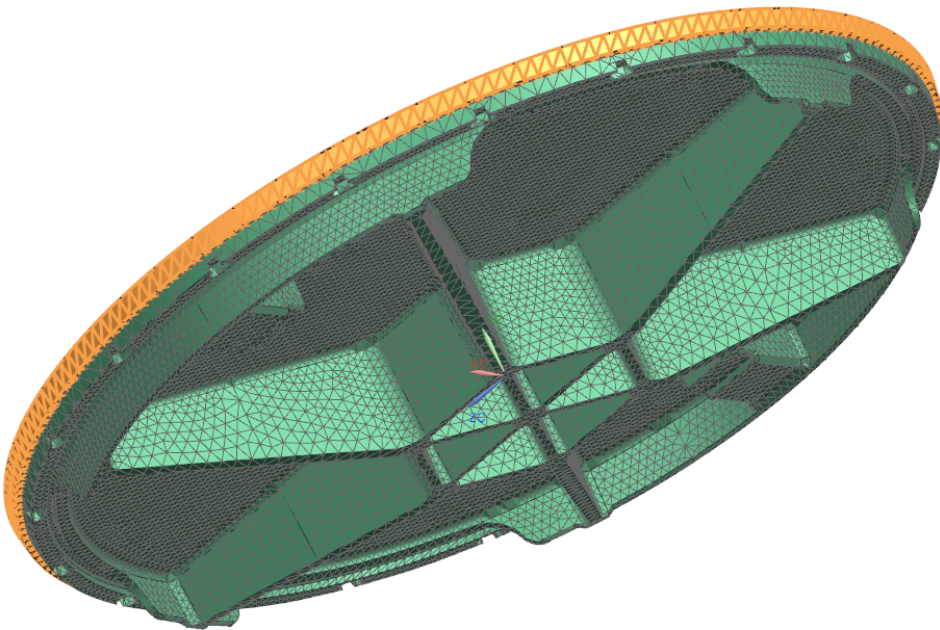
NS-EN 124 beskriver hvordan lokket skal belastes med 2/3 av prøvelasten fem ganger. Pålastningshastigheten skal være mellom 1 og 5 kN/s. Denne lasten ble representert i eget «subcase», eller underdeling i den statisk ikkelineære analysen.

Om denne lasten faktisk betraktes av NX som en pulserende last i de statisk ikkelineære analysene den har vært en del av har det vært usikkerhet rundt, og ingen resultater fra beregninger med denne lasten er tatt med i rapporten. Allikevel beskrives den i vedlegg B, for å vise at det er gjort et forsøk på å forholde seg til standardens beskrivelse av prøvingslaster.

3.1.1.2 Mesh og materiale

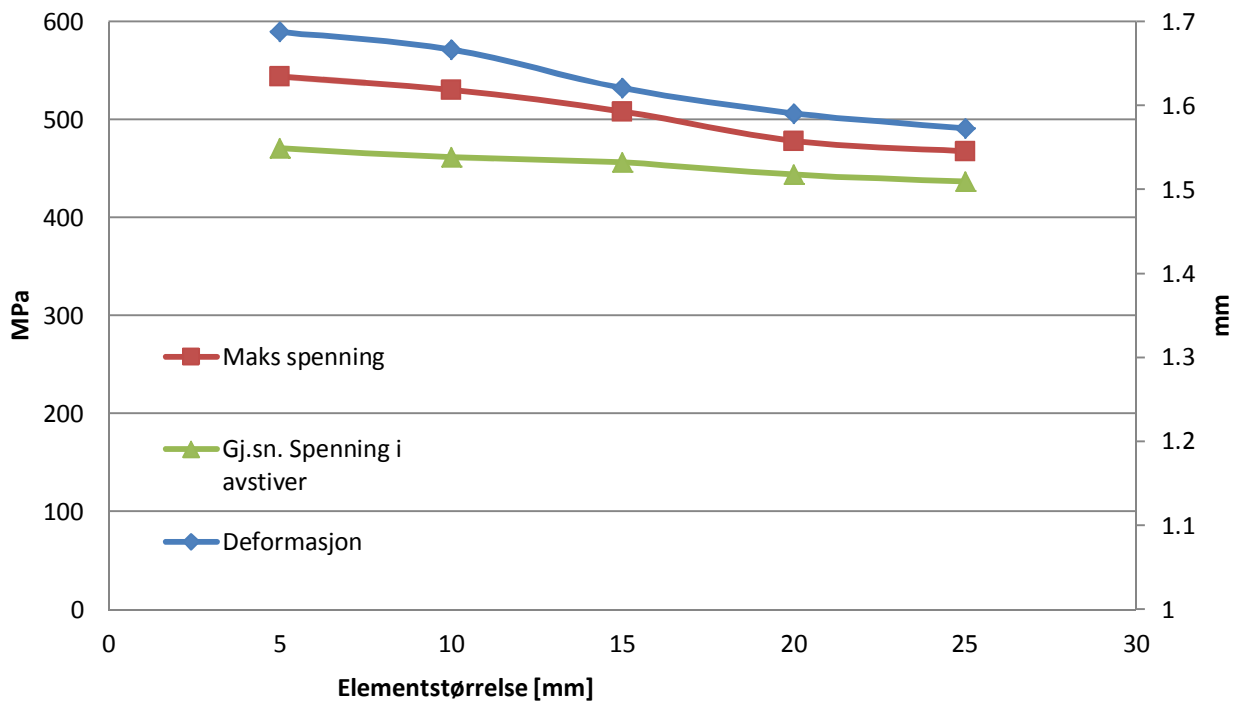
Det ble ved alle simuleringer tatt i bruk mesh med tetra10 elementer (se vedlegg A). Denne typen element gir de beste resultatene ved simulering av tredimensjonale modeller og «free meshing», selv om antall knutepunkter og elementstivheter går opp og øker antallet ligninger som må løses (sammenlignet med for eksempel tetra4 som har 4 noder). «Free meshing» vil si at programvaren genererer mesh tilpasset geometrien. Alternativet er «mapped meshing». Ved «mapped meshing» tas det i bruk elementer med rektangulære sideflater (heksaeder) med 8 eller 20 noder, og brukeren forteller programvaren hvor mange like elementer et volum skal deles opp i. Denne

typen mesh fungerer bra for enkle geometrier, men er uforutsigbar om geometrien blir komplisert (17). Figur 14 viser hvordan modellen ble delt opp og meshet i to omganger. På denne måten kunne meshet på undersiden, der det er interessant å se på spenninger og tøyninger, endres uten at meshet på oversiden måtte oppdateres.



Figur 14: Oppdeling av mesh.

Ved valg av størrelse på elementene vurderes analysens nøyaktighet opp mot hvor lang tid den vil ta å gjennomføre. Resultatenes nøyaktighet øker ved bruk av mindre elementer, spesielt i områder der spenningene endrer seg raskt. Ofte vil verdier for maks spenning øke med minkende elementstørrelse, men med unntak av singulariteter grunnet «uendelig skarpe» kanter, vil de konvergere mot en verdi. Uendelig skarpe kanter vil føre til at spenningen i dette området divergerer, og er å anse som en feilmode i meshet. Det er gjort en såkalt konvergenstest av elementstørrelsen for å finne ut av hvilken størrelse det er fornuftig å bruke. Maks deformasjon, maks Von Mises spenning og gjennomsnittlig Von Mises spenning i bunn av avstiveren i lokkets midt er plottet som funksjon av elementstørrelse på Figur 15.



Figur 15: Konvergenstest

Modellen ble delt opp i to mesh som vist på Figur 14 og belastet med 400 kN. Meshet av lokkets overside ble ikke endret. Det hadde elementer med størrelse 20 mm i alle simuleringene i konvergenstesten. Meshet av lokkets underside ble gradvis forfinet. Endringene i spenning og deformasjon er relativt små. Elementer med størrelse 10 mm antas å gi realistiske resultater.

Statisk lineær analyse

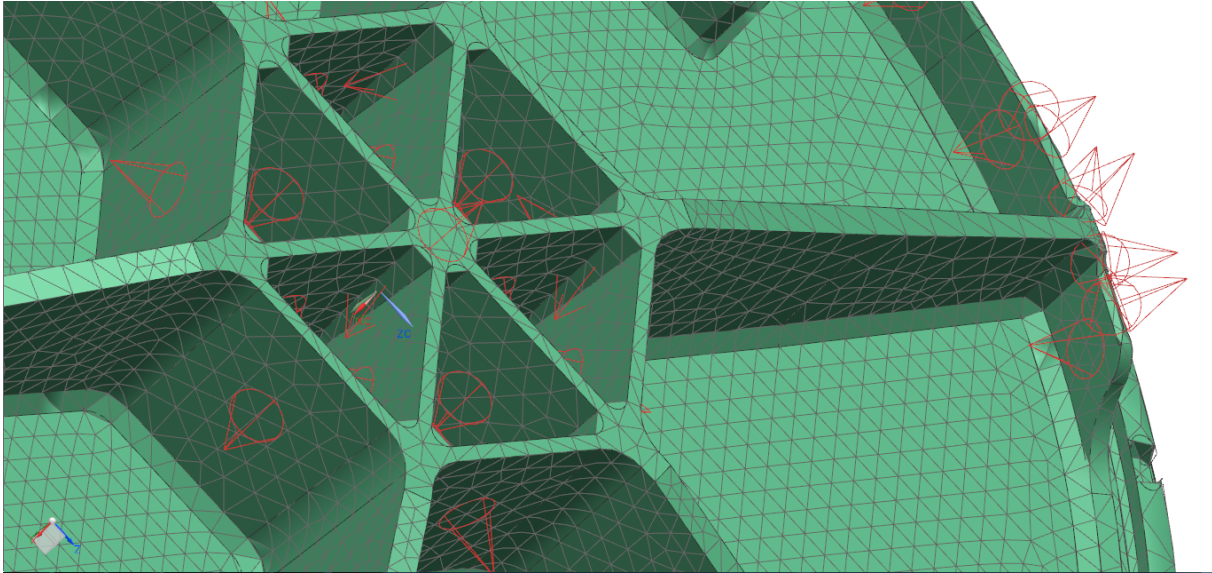
Det ble i de statisk lineære analysene hovedsakelig tatt i bruk 10.2 mm elementer. Noen steder (i overgangene mellom ribbene inne ved avstiveren og i områder med mange små flater) ble meshet forfinet ned til 2 mm. Materialeegenskapene til modellen hentes fra egenskapene til EN-GJS-500-7 i SS-EN 1563: 2012 (3):

- Flytegrense, $R_{p0.2} = 320$ MPa
- Strekkfasthet, $R_m = 500$ MPa
- Elastisitetsmodul, $E = 169000$ MPa
- Poissons ratio, $\nu = 0.275$
- Massetetthet, $\rho = 7100$ kg/m³

Meshet i de statisk lineære analysene av det nye designet bestod av 96031 tetra10 elementer og 185845 noder. Det ble i designprosessen gjort mange statisk lineære analyser av forskjellige modeller meshet med elementstørrelse 10.2 mm. Antallet elementer har variert, men har vært i størrelsesorden 100000 elementer.

Statisk ikkelineær analyse

I de statisk ikkelineære analysene ble det for å redusere antallet ligninger tatt i bruk et grovere mesh. Lokkets overside ble meshet med elementer på 25 mm, og lokkets underside med elementer på 15 mm. Meshet ble i overgangene mellom ribber og avstivere og i overgangene mellom ribber og skjørt forfinet ned til 10 mm. Meshet bestod av til sammen 51452 tetra10 elementer. Antall noder var 103532.



Figur 16: Et utvalg av flatene som fikk forfinet mesh til 10 mm elementer.

I tillegg til materialdata nevnt over ble det lagt inn *styrkekoefisient*, K , og *fastningsekspONENT*, n , i materialet tatt i bruk i de ikkelineære analysene. Dette er konstanter som beskriver materialets flytespenning når det tøytes plastisk ved hjelp av potensloven beskrevet ved ligning (15):

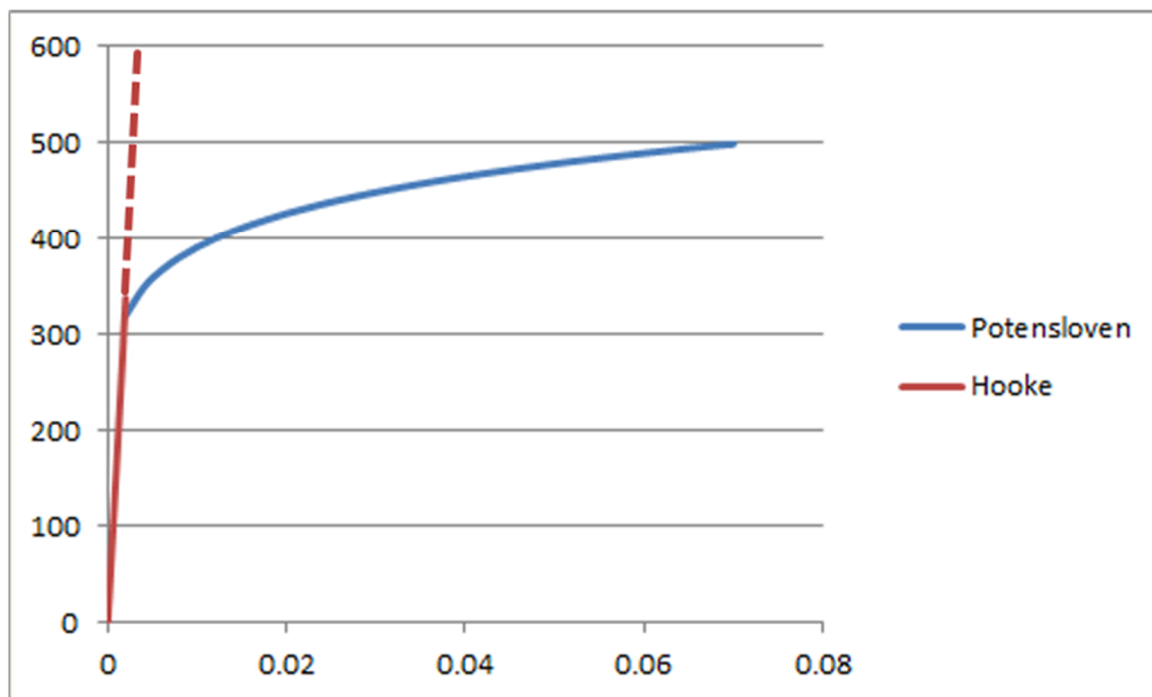
K og n ble funnet ved å bruke strekkfasthet, flytegrense og deres tilhørende tøyingsverdier.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{K \varepsilon_1^n}{K \varepsilon_2^n} \quad (19)$$

Ligningssystemet (16) løses og vi får

- Styrkekoefisient, $K = 695.8 \text{ MPa}$
- FastningsekspONENT, $n = 0.125$

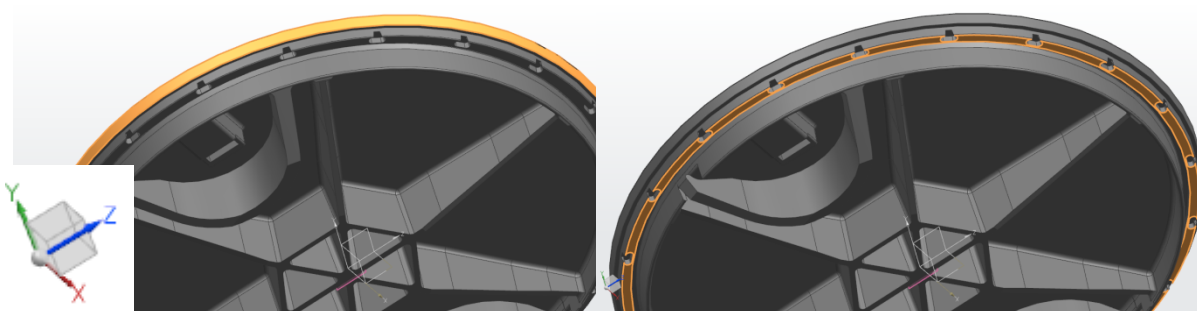
Figur 17 viser en sammenligning av potensloven og Hookes lov. Ved hjelp av styrkekoefisient og fastningsekspONENT kan materialet i en ikkelineær analyse tolkes på en mer realistisk måte. En statisk lineær analyse ville utvidet den lineære tøyingskurven (stiplet rød linje).



Figur 17: Potensloven og Hookes lov.

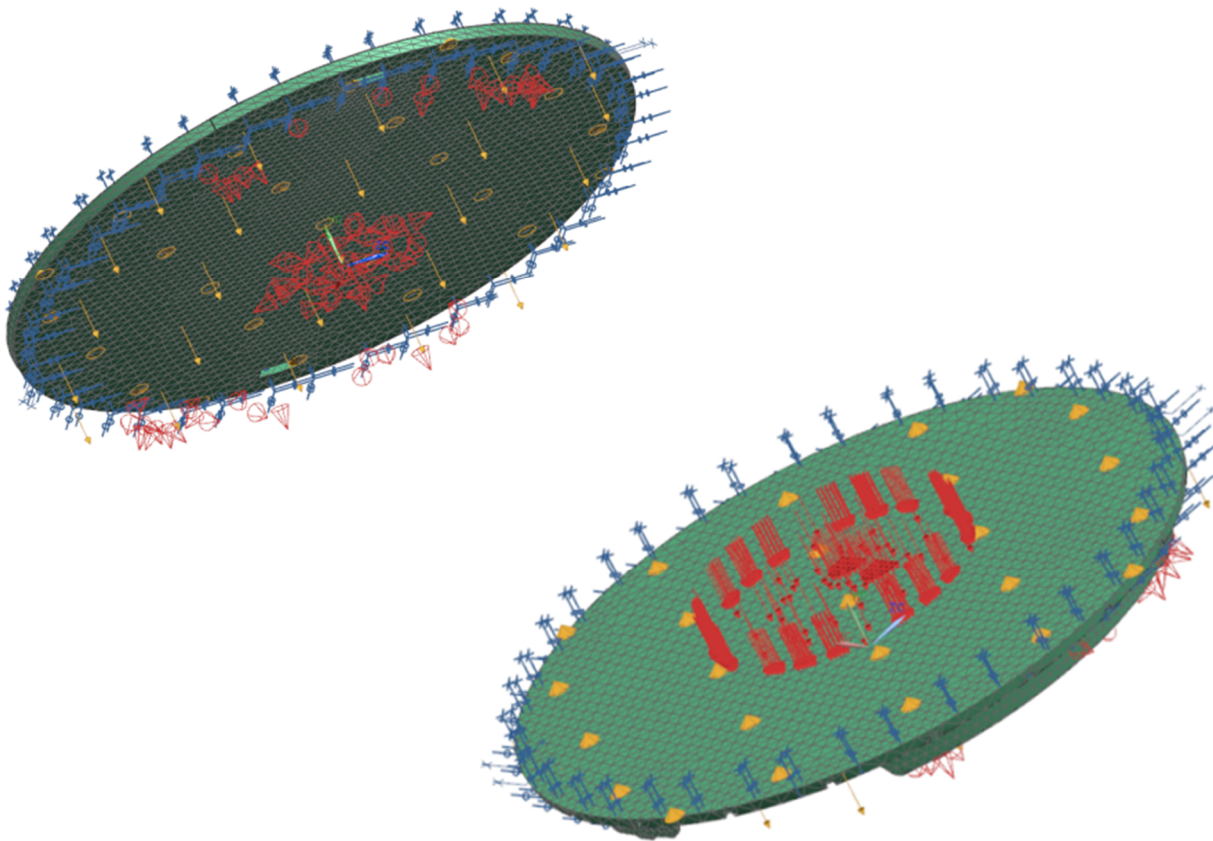
3.1.1.3 Grensebetingelser

Lokkene har en påstøpt polyuretanpakning der de hviler mot rammen. Denne pakningen ble etter en samtale med medarbeidere hos Ulefos fjernet for å forenkle simuleringen. Pakningen ville ikke ha påvirket hverken spenning eller deformasjon i modellen. Figur 18 viser en oversikt over modellens opplagring. Flaten markert på bildet til venstre er fastholdt mot forskyvning i z og x-retning (horisontalt) og fastholdt mot rotasjon om z og x-aksene. Flaten markert på bildet til høyre er fastholdt mot forskyvning i y-retning (vertikalt).



Figur 18: Oversikt over opplagring

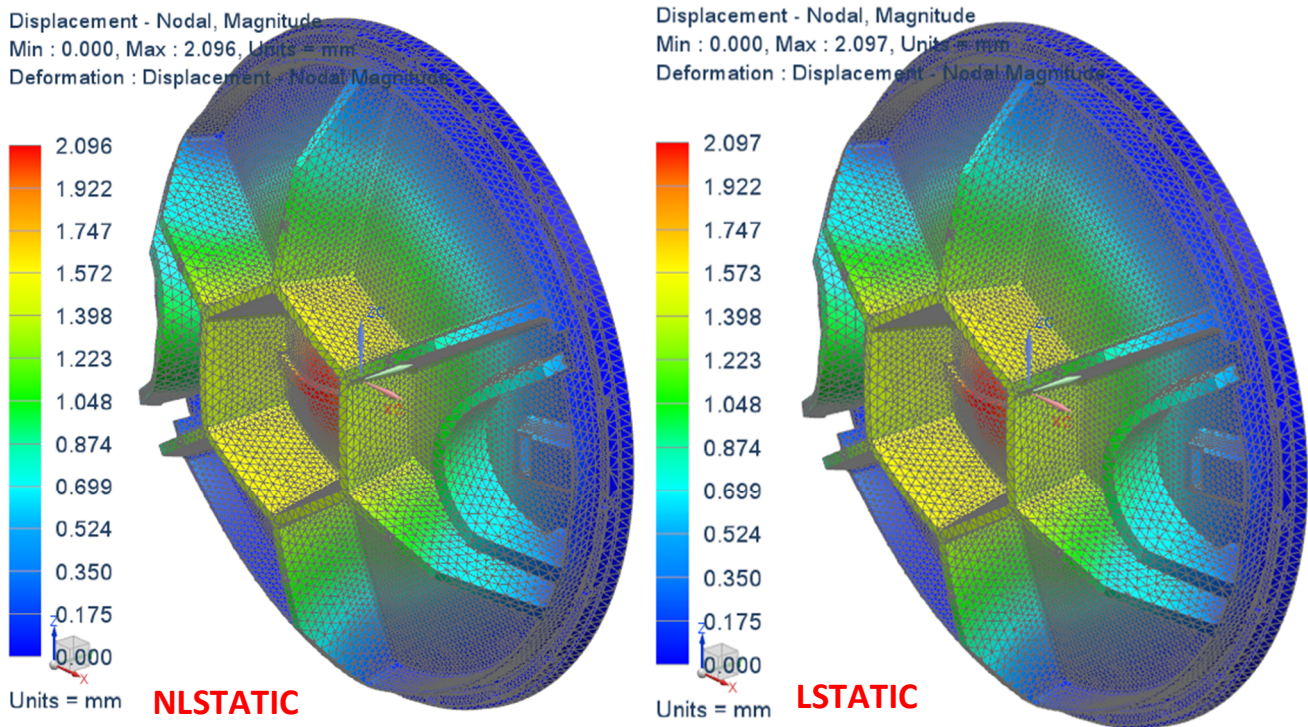
Det ble brukt surface-surface glue mellom de to meshene, representert ved gule piler på Figur 19. Surface-surface glue er en grensebetingelse som gjør at elementene på flatene som limes ikke kan bevege vekk fra hverandre i noen retning. Elementene er som limt til hverandre. Det skjer ingen sammenføring av noder. Allikevel vil surface-surface glue gjøre at de to meshene kan betraktes som ett sammenhengende mesh.



Figur 19: Surface-surface glue

3.1.1.4 Sammenligning

De plastiske deformasjonene er relativt små, og simuleringen er i liten grad avhengig av kontaktflater eller endringer i opplagring. Forskjellene mellom materialmodellene som blir tatt i bruk i de to analysene ble antatt å gi utslag, men etter å ha studert sammenligninger av statisk lineære (LSTATIC) og ikke-lineære (NLSTATIC) analyser av NSTVL vist på Figur 20, ble det avgjort at de kunne neglisjeres. Det ble besluttet at statisk lineære analyser er tilstrekkelig ved analyser av forskjellige lokk i designfasen.



Figur 20: Sammenligning av analyser.

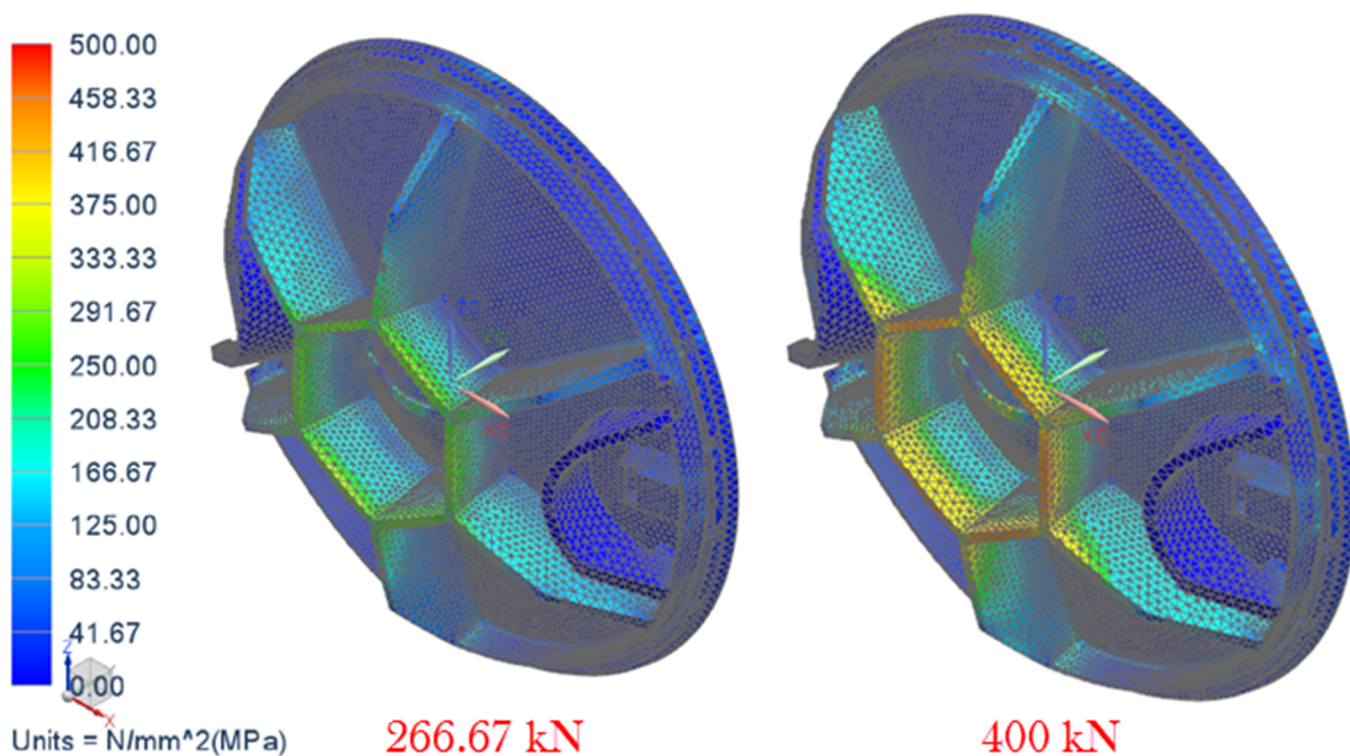
3.1.2 Resultat av analyser av dagens lokk og formvariasjoner

3.1.2.1 Resultater av analyser av NSTVL

De høyeste Von Mises-spenningene i NSTVL, ved belastning med 2/3 av prøvingslast var på 307 MPa. Ved belastning med hele prøvingslasten er de høyeste spenningene i lokket 461 MPa. Standarden oppgir at det ved belastning med hele prøvingslasten ikke skal være noen synlige sprekker i kumlokkets gods. Dette tolkes som at lokket kan ha maksimale spenninger på omlag 500 MPa (seigjernets strekkfasthet). Dagens lokk ligger tett på flytegrensa ved 2/3 belastning og relativt tett på strekkfasthet ved full belastning. Dagens lokk vil hovedsakelig kunne slankes ved å kartlegge områder der materialet ikke utnyttes i særlig grad og fjerne deler av dette materialet.

Figur 21 viser spenningsplott av NSTVL belastet med 266.67 kN (største spenning 307 MPa) og 400 kN (største spenning 461 MPa). Spenningene er høyest ved avstiverens underkant. Det er en del materiale med lav grad av utnyttelse.

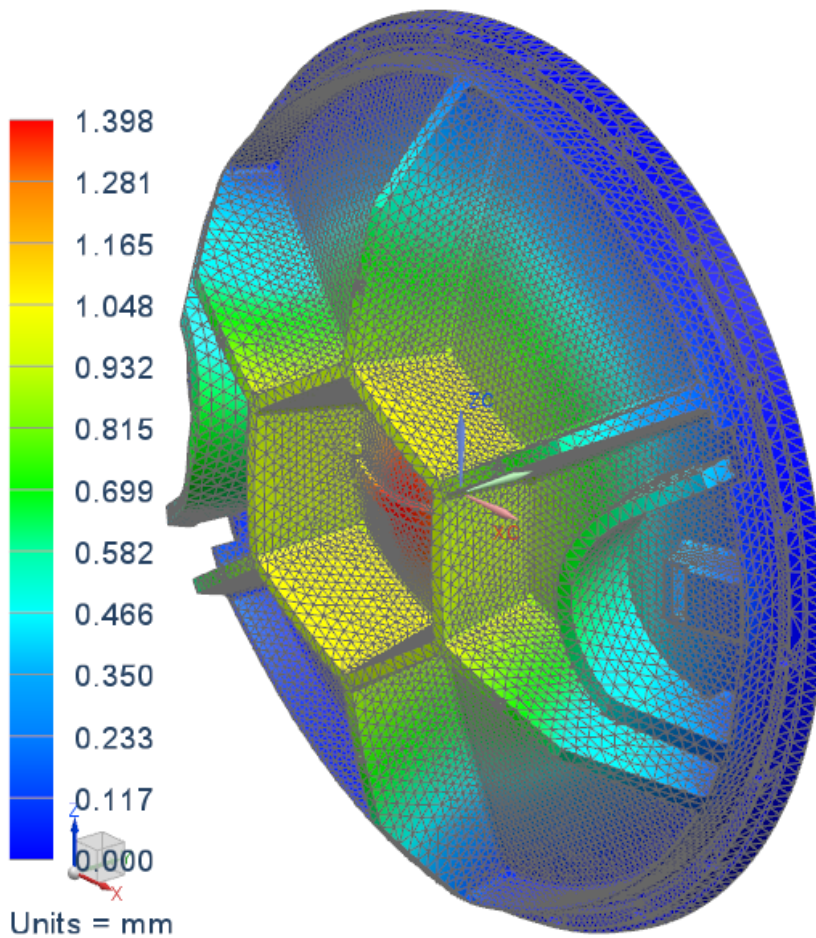
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Elemental, Von-Mises



Figur 21: Spenningsplott av NSTVL.

Deformasjonene i NSTVL etter fem ganger belastning med 2/3 av prøvingslasten vises i Figur 22. Deformasjonen er størst i lokkets sentrum, der den er på 1.34 mm.

Displacement - Nodal, Magnitude
Min : 0.000, Max : 1.398, Units = mm

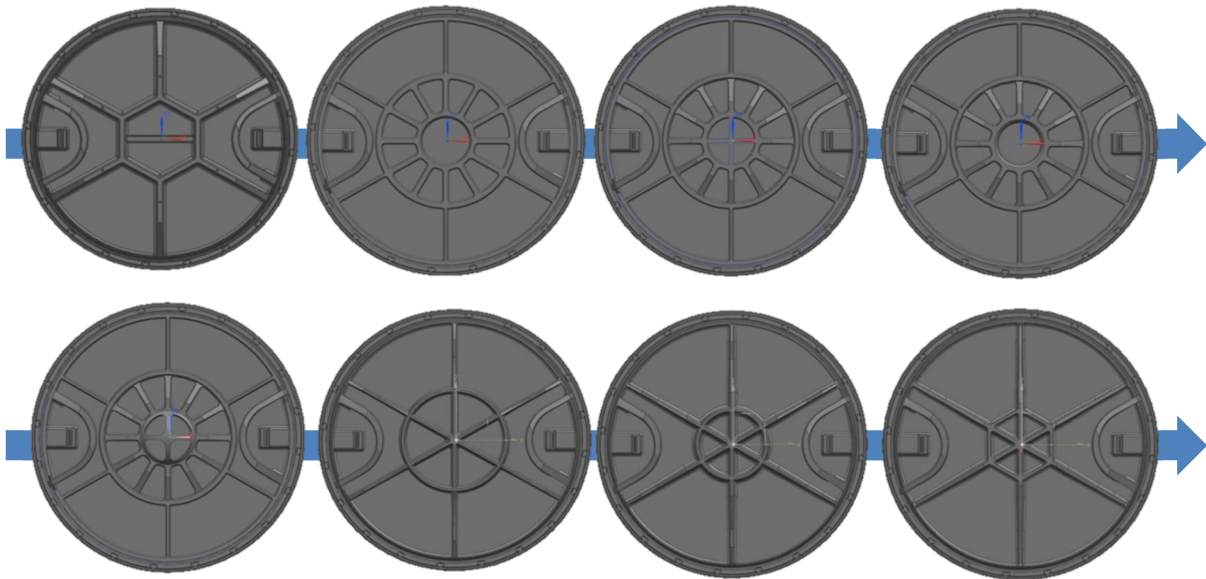


Figur 22: Deformasjonene i NSTVL.

3.1.2.2 Formvariasjoner

Med utgangspunkt i den originale modellen (tilsendt av Ulefos) eksperimenteres det en hel del med forskjellige former. Disse modelleres og analyseres i NX. Formvariasjonen var kreativ i begynnelsen, så mer og mer iterativ etter hvert som det av analysenes resultater kom frem hvordan man på best mulig måte fikk utnyttet materialet.

Figur 23 viser et kronologisk utdrag av hvordan utforming av ribbene på lokkets underside har variert og utviklet seg. Formvariasjonen var en iterativ prosess, og det var ved å studere resultatene av analyser av de forskjellige lokkene man avgjorde hvordan man ville endre formen. Det ble i begynnelsen gjort en del analyser av lokk med sirkelformet avstiver. Den sekskantede avstiveren viste seg allikevel til slutt å gi best utnyttelse av materialet.



Figur 23: Formvariasjoner

Nedbøying av og bøyemoment i bjelker er en funksjon av arealtrehetsmoment og elastisitetsmodul, eller bøyestivhet. Ved å endre på ribbenes geometri ønsker man å få et høyere arealtrehetsmoment om aksene ribbene bøyes om, og dermed en høyere bøyestivhet samtidig som vekten holdes nede (6). Arealtrihetsmomentet for rektangler brukes til sammenligning her selv om ribbene på grunn av slippvinkler ikke vil være helt rektangulære. Ved løsning av ligning (6):

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (20)$$

Formelen gjør det tydelig at om man vil ha så høyt som mulig arealtrehetsmoment i et lett som mulig profil så bør man gjøre profilet så høyt og tynt som mulig. Måten lokkene testes på har vært avgjørende ved variasjoner i form og måten resultatene av de forskjellige analysene ble betraktet på. I NS-EN 124, 8.3; Prøvingsprosedyre (2) står det om testing av lokk:

«Alle sluktopper og kumtopper skal gjennomgå følgende prøvinger:

- *måling av kumlokkets eller ristens varige deformasjon etter påføring av 2/3 av prøvingslasten (8.3.1);*
- *påføring av prøvingslasten(8.3.2).*

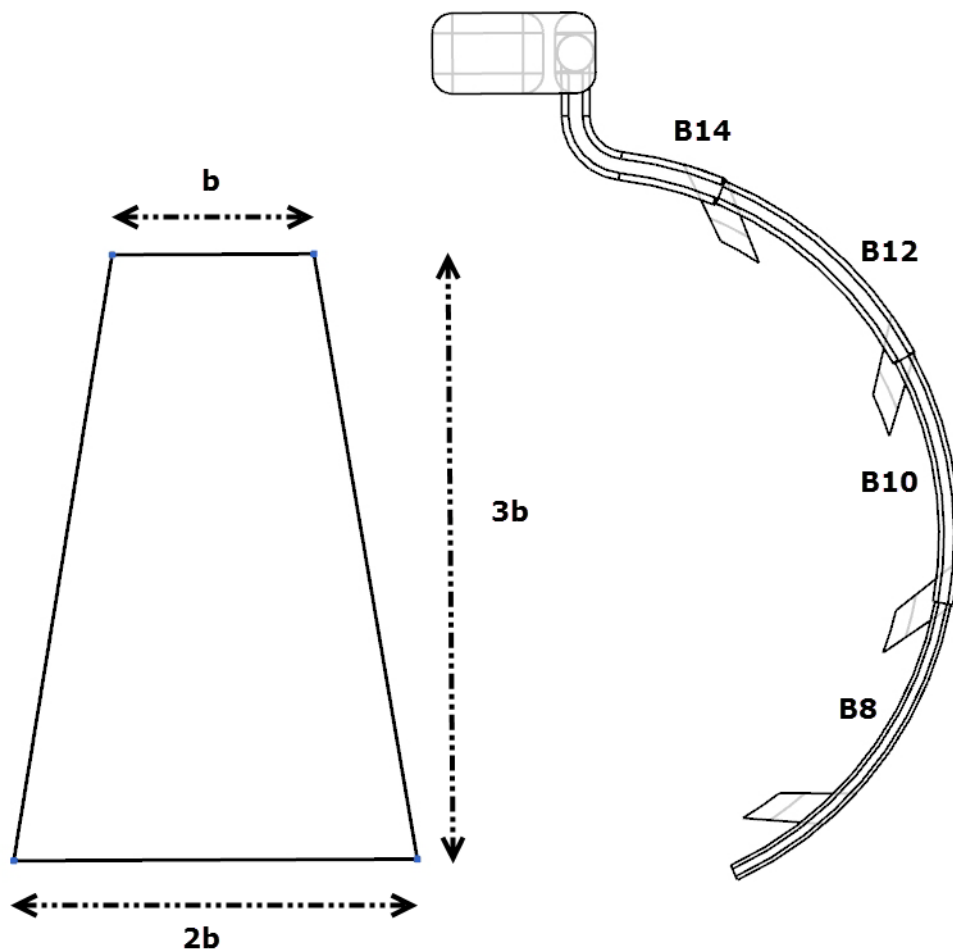
Videre står det at det etter fem ganger belastning med 2/3 av prøvingslasten er tillatt en varig deformasjon på 1/300 av lokkets frie åpning. Derfor er det ved formvariasjonen gjort et forsøk på å finne en form som deformeres plastisk ved 2/3 av prøvingslasten samtidig som spenninger ved full pålastning ikke overstiger materialets strekkfasthet.

3.2 Støpesimuleringer i MAGMA5

Magmasofts MAGMA5 er programvare som tar i bruk elementmetoden ved simuleringer av fylling av støpeformer og størkning av støp. MAGMA5 har blitt tatt i bruk til simuleringer av støp av NSTVL og nytt design med forskjellige løpsystemer. Analysenes resultater har blitt studert med fokus på smeltens hastighet og temperaturer i formen ved fylling, porøsitet i ferdig støp, mikrostruktur og mekaniske egenskaper. Materialets mikrostruktur og mekaniske egenskaper har blitt sammenlignet med og vurdert opp i mot resultater av spenningsanalyser fra NX og testing av støpte lokk. Det har blitt gjort en rekke simuleringer der parametere som grad av ymping og avkjølingshastighet i bestemte temperaturområder har blitt endret. Det har vært et mål å få resultater av simuleringer i MAGMA5 til å sammenfalle med støping av lokk i så stor grad som mulig, og å se hvordan forskjellige parametere påvirker jernets mekaniske egenskaper.

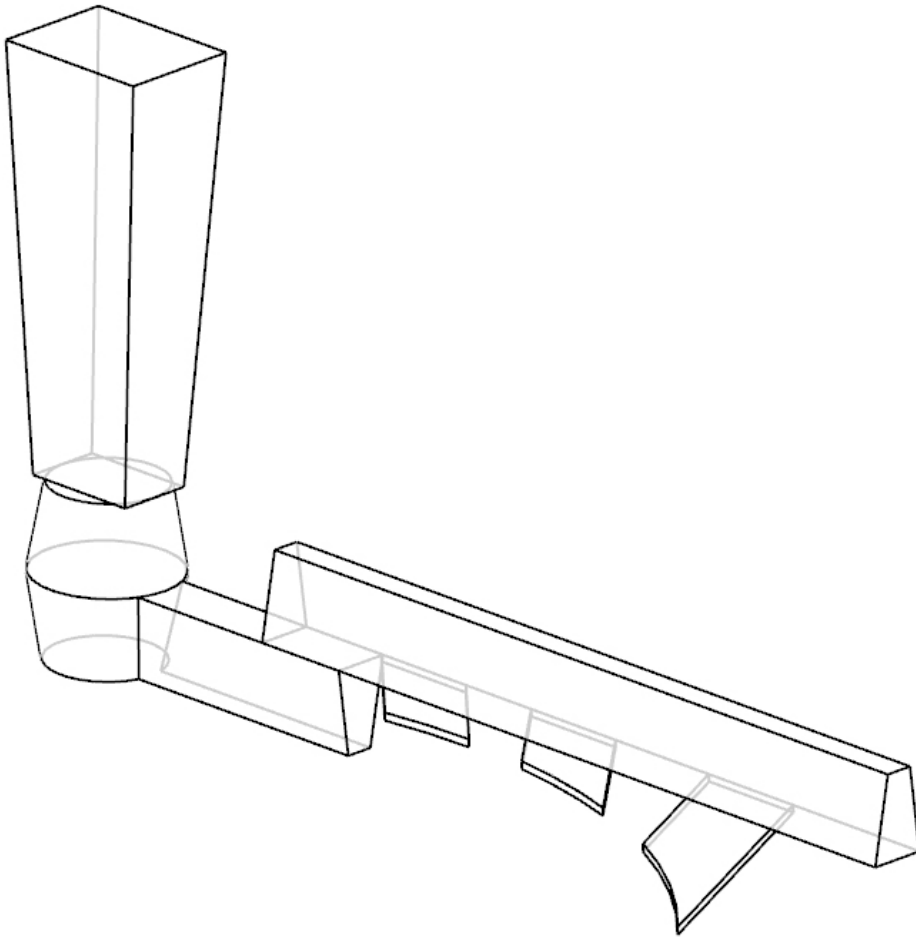
3.2.1 Geometri

Løpsystemet Ulefos bruker ved støping på automatisk linje ble forsøkt gjenskapt så nøyaktig som mulig. Løpsystemet ble tegnet i NX etter mål tilsendt av Ulefoss. Det tas i bruk såkalte B-løp i løpsystemer uten filter. Dette er løp der det horisontale løpet er trapesformet, som vist på Figur 24. Et B14-løp er et horisontalt trapesformet løp der $b = 14$ mm. Dimensjoner på horisontalt løp avhenger av totalt areal av innløp løpet fører til. Innløpene ligger under de horisontale løpene. De er 10 mm i høyden under horisontalt løp og 4 mm ved innløp til støpeform. De er 44 mm i bredden. Horisontalt løp går 100 mm forbi siste innløp. Det er 1000 mm langt. De fire innløpene er jevnt fordelt utover det horisontale løpets lengde. Innløpenes vinkel i forhold til horisontalt løp ble fastslått ved å studere bilder av løpsystem tatt ved besøk i støperiet. Det vertikale innløpet er 215 mm høyt. Det har en diameter i toppen på 37.1 mm, og en diameter i bunn på 36.0 mm.



Figur 24: Oversikt over løpsystem.

Løpsystemet som ble tatt i bruk under prøvestøping (vist i Figur 25) er også modellert og brukt i simuleringer. Dette hadde en noe enklere utforming. Hele det horisontale løpet var et B15-løp. Den korte delen var 130 mm lang og den lange delen var 400 mm lang. Løpsystemet hadde tre innløp. Disse var 4 mm høye og 55 mm brede. Innløpene ble filt for hånd og det ble ikke tatt nøyaktige mål av deres plassering i forhold til resten av løpsystemet eller lokket. Deres plassering er modellert så likt virkeligheten som mulig ved hjelp av bilder tatt under forming. Det vertikale nedløpet var 220 mm høyt og rektangulært. Det var 40 mm x 60 mm i bunn og hadde en vinkel på 3 grader. Brønnen tatt i bruk var todelt. Hver del var konisk. Den minste diameteren var på 60 mm og konet hadde 10° vinkel. Begge delene var 45 mm høye.



Figur 25: Løpsystem tatt i bruk ved håndforming.

3.2.2 Materialer, mesh og definisjoner

Alle modeller av lokk og løpsystem ble tegnet i NX8 og importert i MAGMA5 som STP-filer. Materialet GJS500-7 ble plukket ut av MAGMA5 sine databaser og modifisert med hensyn til legeringselementer. Kjemisk sammensetning av smelte produsert samme dag som prøvestøp ble gjort ble kopiert. Det ble ikke gjort analyser av jern brukt ved prøvestøping så det vil være små avvik (blant annet på grunn av mengde ympemiddel), men disse antas å være neglisjerbare.

Tabell 3: Kjemisk sammensetning av seigjern.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mg	Mo	Sn
3.61	2.56	0.55	0.043	0.009	0.061	0.043	0.08	0.037	0.007	0.005

Sandboksen ble modellert som en blokk, ikke todelt med overkasse og underkasse. Grunnen til å modellere underkassa og overkassa hver for seg er at det gjør det mulig å simulere at de blir slått vekk en og en (fjerning av sanda, kalt shake out). Dette gir flere muligheter med hensyn til avkjøling av støpegodset. Det har blitt gjort simuleringer med shake out på forskjellige tidspunkter, men underdelen og overdelen ble slått vekk samtidig. Derfor vil ikke forenklingen av sandboksens

geometri påvirke resultatene negativt. Sanda ble modellert som «green sand». Dette tilsvarer råsand som tas i bruk ved støping på automatisk linje. «Inlet» (tverrsnitt av strålen ved helling av smelte) ble modellert 10 mm høyt og med radius på 10 mm. Dette volumet bør romme minimum tre elementer i høyden. For at simuleringen av smeltens flyt skal bli så realistisk som mulig er det et poeng at det er plass til minimum 3 elementer smelt i dybden under «inlet» før smelten treffer sand. Ventilasjon ble modellert. Ved simuleringer av prøvestøp ble det modellert fire ventilasjonssjakter med radius på 1 mm fordelt utover lokkets overside. Det ble ved simuleringer av lokk støpt på automatisk linje også modellert ventilasjon, selv om det ikke brukes i praksis. Dette var for å aktivere analyse av sandens permeabilitet og førte til at resultater med hensyn til trykk inne i formen kunne studeres.

Ymping kan settes opp som «fair», «good» eller «very good». I tillegg kan tilpasses ved å justere prosentvis virkningsgrad. Behandling av smelte har blitt modellert som «good – 100%» og «fair - 100%», avhengig av simulering. «Good – 100%» tilsvarer ymping i stråle ved helling av smelte fra kupe ned i støpeform. «Fair – 100%» tilsvarer ymping i bunn av kupe.

Helletid ble satt til 12 s. Denne tiden er oppgitt av Ulefos. Fylling over 12 sek. ser ut til å fungere bra og antas å gi en realistisk analyse. Det ser ikke som løpkulpen renner over. Ved generering av mesh ble det huket av for solver5. Solver5 gjør det mulig å ta ut resultater fra analyse av overflatespenning. Det vil også gi mer nøyaktige resultater med hensyn til fylling da elementene kan deles opp i prosentvis andeler sand og jern. Uten solver5 vil elementene betraktes som om de består av 100 % sand eller smelte. Det er 6.5 mill kubiske elementer i meshet.

Det er to feilmodi som kan forekomme i meshet (18):

1. «Edge-edge»-elementer er elementer som bare kommer i kontakt med andre elementer langs kantene. Dette fører til dårlige resultater ved analysering av temperaturendring.
2. «Thin wall»-elementer er elementer som på egenhånd utgjør hele tverrsnittet (tverrsnittet er ett element i bredden, dybden og høyden). Også dette fører til dårlige resultater ved analysering av endring i elementenes temperatur.

Det var 233 «edge-edge»-elementer og 320 «thin wall»-elementer i meshet. Det antas at antallet elementer med feil ikke er høyt nok til å påvirke analysen.

3.2.3 MAGMAIron

MAGMAIron gjør det mulig å studere mikrostrukturen til jernet når det er støpt. Det gir oversikt over nodultetthet, andeler sementitt, ferritt, perlitt osv. Hvordan forskjellige avkjølingshastigheter påvirker det ferdige støpets kvalitet med hensyn til strekkfasthet og duktilitet har blitt studert. Forskjellige grader av ymping og hvilken påvirkning dette har på det ferdige støpets mekaniske egenskaper har det blitt brukt mye resurser på. MAGMAIron tar endringer mellom fcc og bcc med i betraktningen. Dette er avgjørende for resultater med hensyn til krymp og porøsitet.

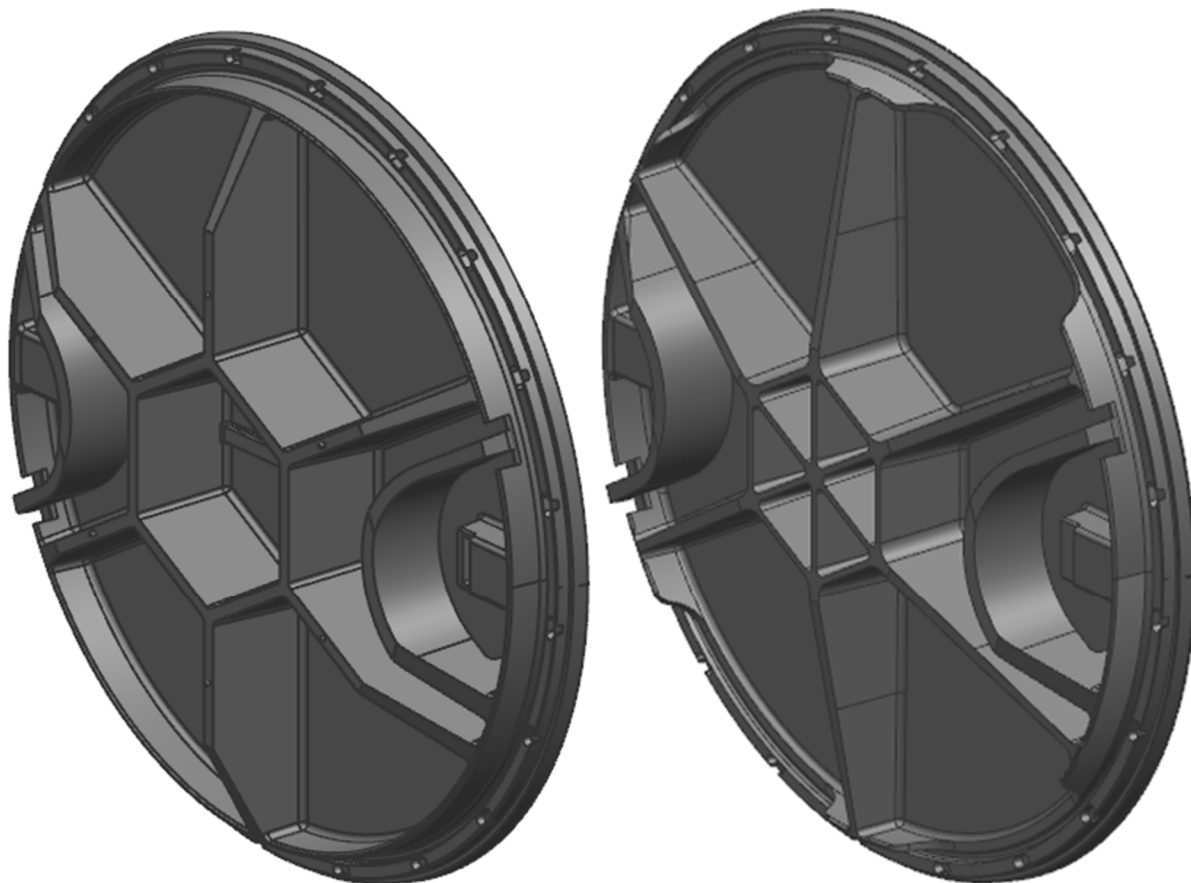
3.3 Nytt design

Ved hjelp av metoder beskrevet over ble det under forprosjektet (19) utviklet et nytt design. Som nevnt innledningsvis har arbeid med reduksjon av støpevekt (vekt av lokk, løpsystem og eventuelle matere) ved utvikling av nytt løpsystem blitt nedprioritert til fordel for nytt design av lokk og støping av dette.

3.3.1 Vekt og geometri

Det nye lokkets vekt ble i NX 8 beregnet å være 42.85 kg (39.95 kg uten låsearmer). Det gamle lokket veide i NX 8 48.58 kg. Lokkets vekt ble ved hjelp av formvariasjoner og analyser redusert med 5.7 kg. Dette tilsvarer 11.8 % av NSTVLs vekt. Vekten ble redusert ved:

- Tynnere vegger i avstiver. Redusert fra 10 mm til 5 mm
- Tynnere vegger i ribber. Redusert fra 10 mm til 10 mm ved avstiver og 7 mm ved skjørt.
- Avstiverens høyde er redusert fra 82.5 mm til 75 mm.
- Ribbenes form er endret.
- Mye av skjørtet er fjernet

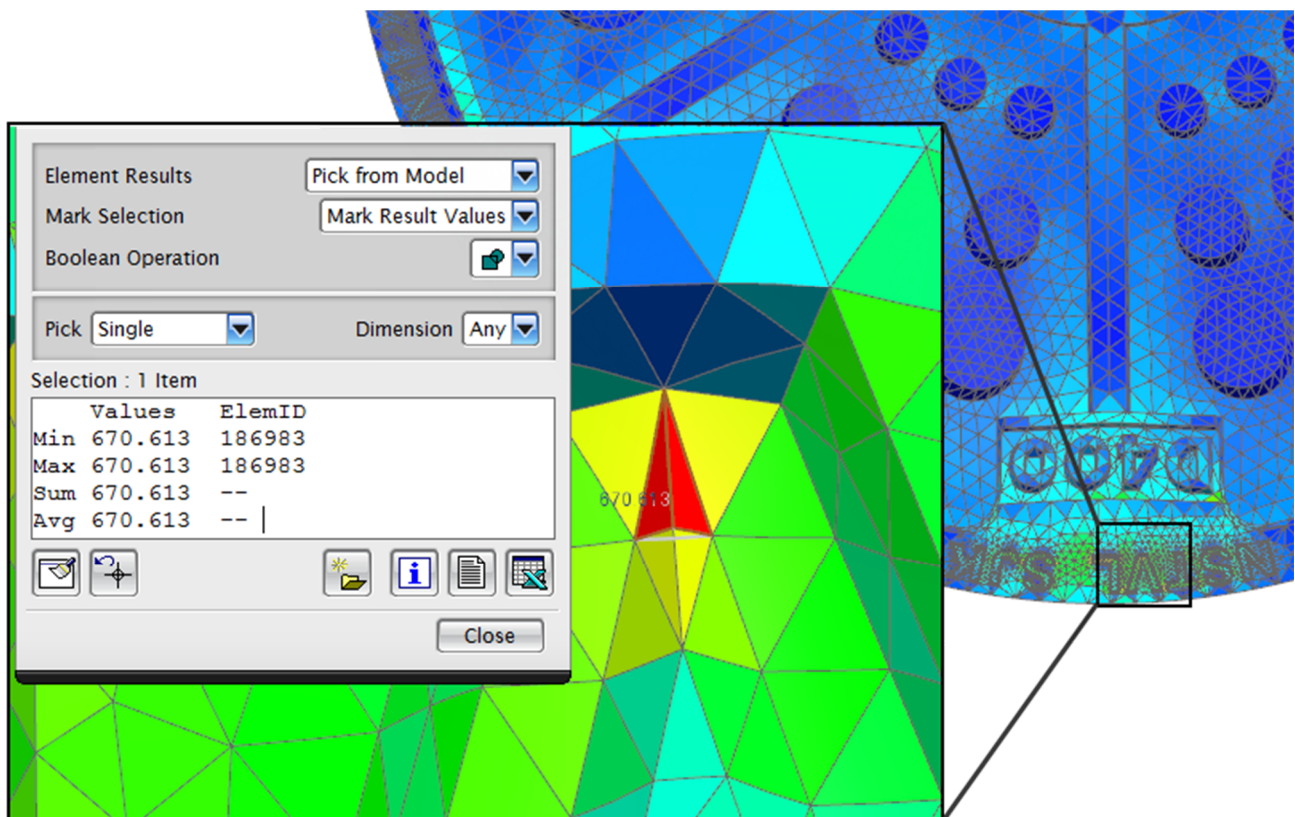


Figur 26: NSTVL til venstre og nytt, lettere lokk til høyre.

Se vedlegg C for fler detaljer rundt lokkets nye geometri. Det er hovedsakelig gjort estetiske endringer av lokkets overside. Mønster og mønsterdybde er i henhold til NS-EN 124, kapittel 7.12 (2). Se vedlegg D.

3.3.2 Spenning

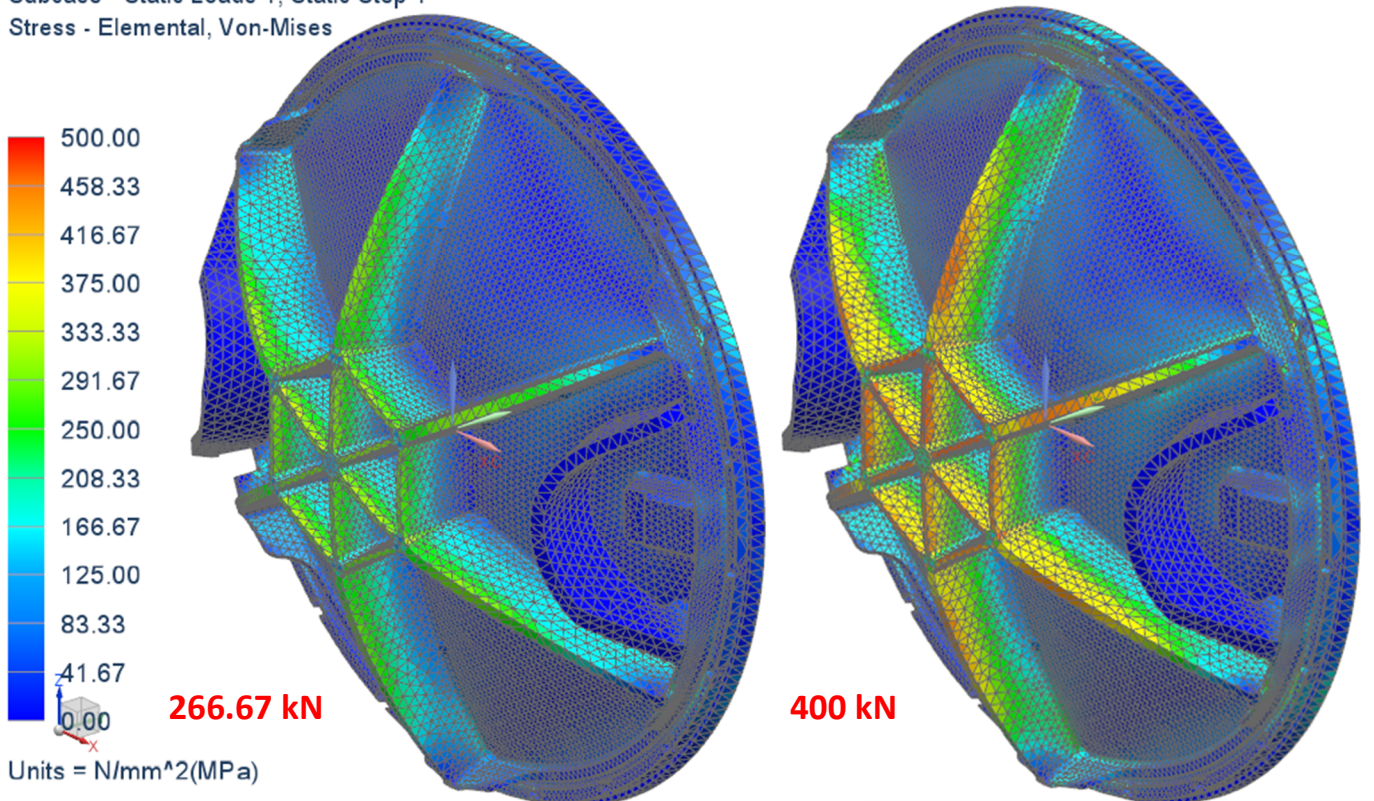
Det nye lokkets ribber har blitt tynnere. Den sekskantede avstiveren har blitt beholdt og det har blitt lagt til ribber i kryss i midten. Von Mises-spenningen i materialet ved ribbenes underkant ligger over flytegrensa $R_{p0.2}$ ved 2/3 belastning og rett under strekkfastheten R_m ved full belastning. 50 elementer i modellen får ved pålastning av hele prøvelasten Von Mises-spenninger som ligger over strekkfastheten til materialet. Disse elementene er alle en del av bokstavene på lokkets overside. Mange av dem er «uendelig skarpe» og resultater med hensyn til spenning i disse områdene må tolkes deretter. De kan være misvisende. Det er ingen uendelig skarpe elementer i meshet av lokkets underside (se 3.1.1.2) og spenningene NX rapporterer om der antas å være realistiske. Figur 27 viser elementet som ved pålastning av hele prøvelasten får den høyeste spenningen i modellen.



Figur 27: Elementet med høyest spenning

Figur 28 illustrerer fordelingen av Von Mises -spenning i det nye kumlokket. Ser man bort ifra bokstavene på lokkets overside forekommer de høyeste spenningene nederst i ribbene og avstiveren. Her er de ved 2/3 belastning (266.67 kN) 313 MPa, og 470 MPa ved full pålastning (400 kN).

Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Elemental, Von-Mises

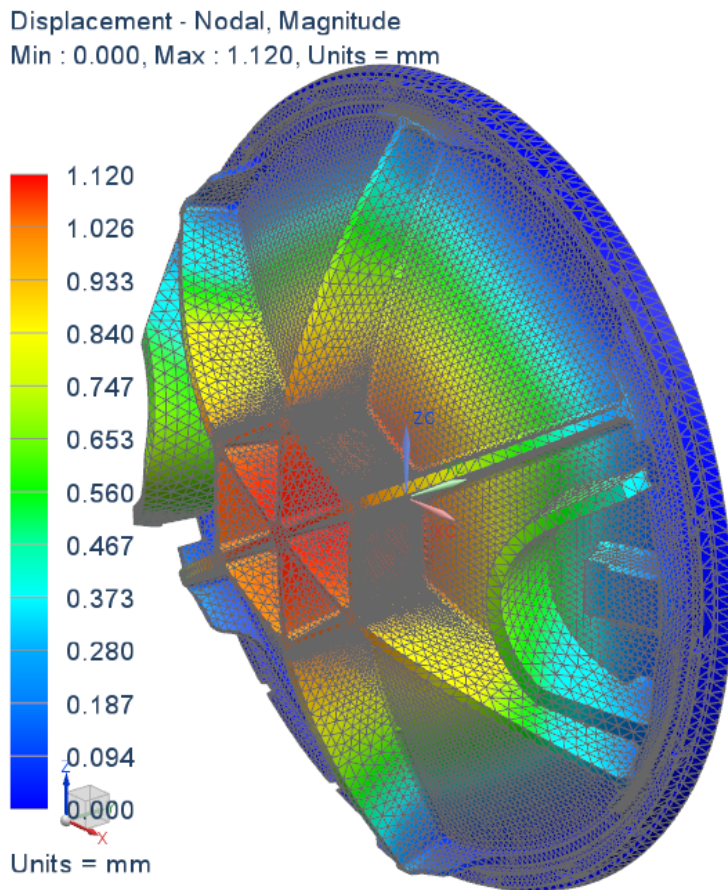


Figur 28: Von Mises spenning.

Disse resultatene tyder på at det nye designet tåler belastningene det vil bli utsatt for ved testing i henhold til NS-EN 124. Hvorvidt disse resultatene er gode eller ikke bør man gjøre et prøvestøp for å avgjøre. Det er mange faktorer det ikke tas hensyn til i NX som spiller inn på om lokket består testingen eller ikke. For eksempel tas det i analysen utgangspunkt i et homogent isotropisk materiale. Hvordan lokket støpes vil avgjøre i hvilken grad dette stemmer. Feilmodi ved støping som porøsitet, inneslutninger, lunkere og gassporer, vil påvirke lokkets egenskaper. Den statisk lineære forenklingen er også en mulig feilkilde.

3.3.3 Deformasjon

Som beskrevet i 1.2.1 tillater NS-EN 124 etter belastning med 2/3 av prøvingslasten 1.98 mm plastisk deformasjon i lokket. På Figur 29 vises den største deformasjonen i det nye designet ved belastning med 2/3 av prøvingslasten. Den er på 1.12 mm og befinner seg i lokkets geometriske senter. Materialet deformeres plastisk i veldig liten grad, og deformasjonene er akseptable.



Figur 29: Deformasjon

Denne deformasjonen er mindre enn deformasjonen i NSTVL var. Det nye designet er stivere.

3.3.4 Resultater av støpesimuleringer i MAGMA5

Analysene som ble gjort i MAGMA5 under forprosjektet ble gjort med et annet løpsystem, utarbeidet med utgangspunkt i retningslinjer beskrevet i (4). På dette stadiet ble det stort sett gjort analyser for å studere smeltens hastighet i løpsystem og form. Hastighetene i det horisontale løpet lå på rundt 1 m/s under hele fyllingen. Smeltens vertikale hastighet i formen kom sjeldent opp i mer enn 0.05 m/s.

3.4 Tilvirkning av støpemodell

Låsearmenes påvirkning på lokkets bæreevne er neglisjerbar, og det ble besluttet at modellen og støpeprosessen kunne forenkles ved å droppe dem.

3.4.1 Materiale

Modellen ble tilvirket av Ebaboard 60-1 (20). Ebaboard 60-1 er et platemateriale laget av herdet polyuretan. Dette materialet ble valgt etter samtale med Freddy Syvertsen ved SINTEF og vurderes som sterkt nok til å forme det antallet støpeformer det er snakk om, samtidig som det egner seg med hensyn til at det skal tilvirkes i fresen på NTNUs prototypelab. Figur 30 er hentet fra datablad for Ebaboard 60-1 (20) og viser en oversikt over materialets mekaniske egenskaper. «Flexural strength» og «flexural modulus» tilsvarer henholdsvis strekkfasthet og elastisitetsmodul for homogene materialer.

Processing data			
Product	ebaboard 60-1		
Colour	red brown		
Density at 20°C	g / cm ³	0,80 ± 0,02	

Physical data			
Properties	Inspect. requirem.	Unit	Value
Flexural strength	EN ISO 178	MPa	20 ± 2
Flexural modulus	EN ISO 178	MPa	890 ± 80
Flexural strength at breakage	EN ISO 178	%	4,7 ± 0,2
Tensile strength	EN ISO 527	MPa	-
Elongation at break	ISO 37	%	-
Impact resistance (Charpy)	EN ISO 179	kJ/m ²	4,5 ± 1
compressive strength 0,75 % proof stress	EN ISO 604	MPa	19 ± 2
Heat resistance (HDT)	DIN EN ISO 75 B	°C	87 ± 3
Shore hardness	DIN 53505	Shore D	57 ± 3
Coefficient of linear expansion	DIN 53752	10 ⁻⁶ K ⁻¹	ca. 53

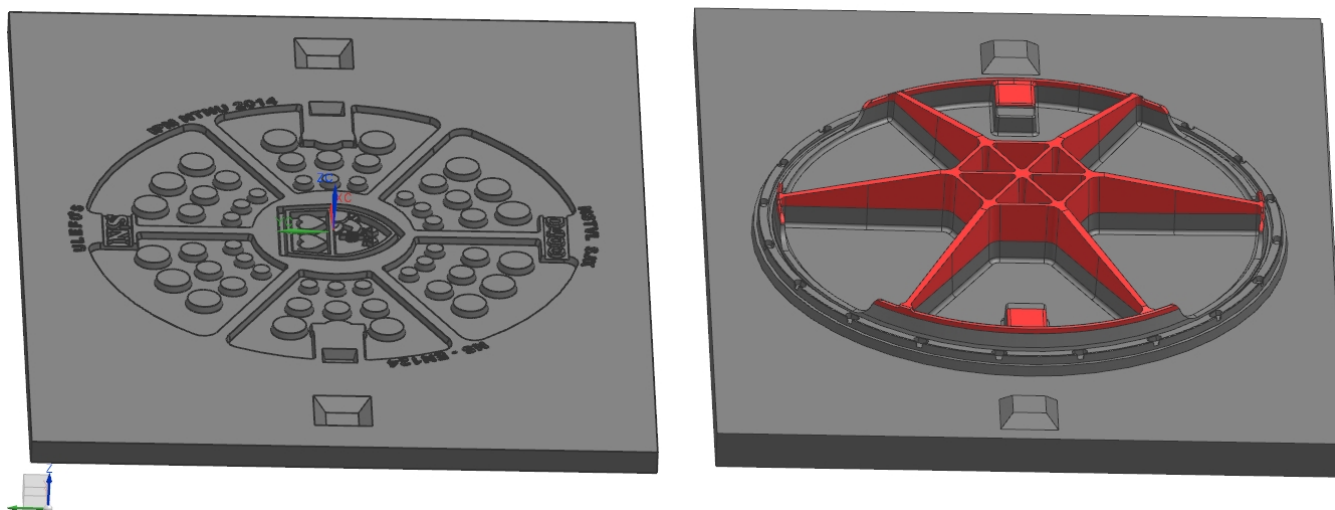
Figur 30: Materialelegenskaper, Ebaboard 60-1.

Platene ble levert av Svas Kjemi med målene 500x1500 mm. Deretter ble de delt på tvers på midten med båndsgag og limt med Super Epoxy (fra Biltema). Nye mål var 1000x750 mm.

3.4.2 Fremgangsmåte

Støpemodellene ble tegnet i NX 8 og eksportert som .stp-filer. Fresebaner ble tegnet opp i NX Ideas før en cnc-fil ble generert og sendt til fresen. Fresen går ikke dypere enn omlag 70 mm. Derfor måtte modellen av lokkets underside formes i to omganger og limes. Løpsystem finnes løst

hos Ulefos det var ikke nødvendig å ta hensyn til det ved utforming av modeller. (5). En oversikt over oppdeling av støpemodel vises på Figur 31. Modellen av lokkets underside ble delt for å passe fresen (markert med rødt). Den øverste delen av modellen av lokkets underside og modellen av lokkets overside ble tegnet med styrepinner. Disse skulle forhindre partforskyvning når sandformene ble lagt mot hverandre. Modellene ble utstyrt med en styring på hver side av lokket. Styrepinnenenes plassering og utforming ble godkjent av Ulefos.

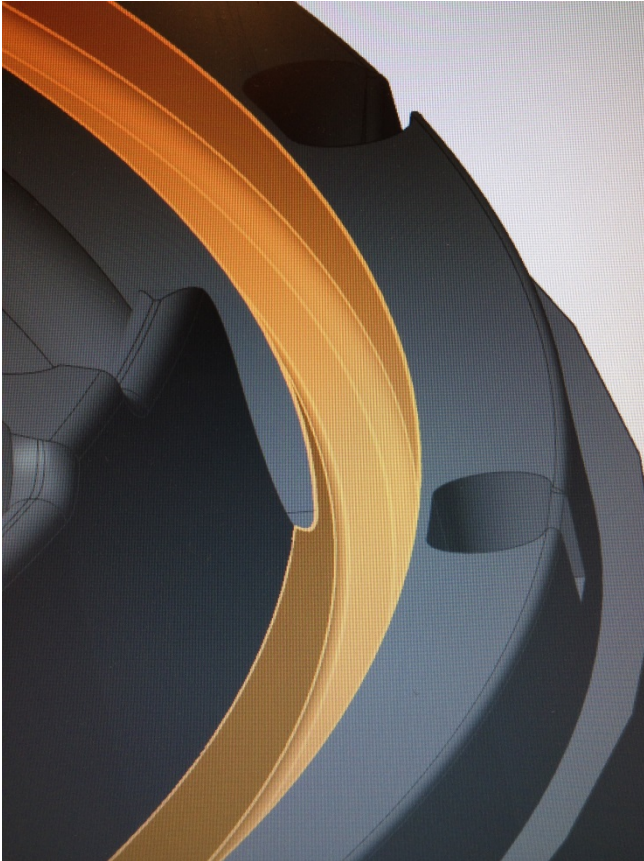


Figur 31: Oversikt over støpemodel

Modellen av lokkets underdel ble skrudd til en sponplate for avstivning. Mye av lokkenes skjørt ble fjernet i designfasen. Det ble derfor nødvendig å forme en sperring eller ramme som kunne forhindre polyuretanpakningen å renne ned på lokkets underside ved støping. Etter samtaler med Ulefos ble det besluttet at sperring skulle tilvirkes hos dem etter lokkene var støpt, og det tilvirkes ingen sperring av ebaboard.

Ved pussing ble alt motslipp som oppstod ved utforming eller liming av modellen fjernet. Dette måtte gjøres for hånd, og uten å fjerne noe av godset. Manuell pussing og små unøyaktigheter ved liming kan ha ført til ujevnheter i godstykkelse forskjellige steder på modellen. Dette vil kanskje kunne påvirke lokkets bæreevne.

Spor og «hull» til gummipakning på utsiden av skjørtet fikk slipp pusset for hånd da prototypelaben ikke var utstyrt med fres som var tynn nok til å frese ut geometrien samtidig som den var lang nok til å frese ned forbi skjørtet. Spor og hull ble formet ved hjelp av bor. Manuelt utformet slipp kan ha ført til ujevnheter i geometri i disse områdene. Dette antas å ikke påvirke bæreevne. Spor og hull er der for at pakningen skal ha noen ekstra flater å feste seg til.



Figur 32: Spor til pakning i NX

På Figur 33 vises den ferdigpussede modellen til lokkets overside. Modellen får feste til kjerner for spetthull i modellverkstedet hos Ulefos. Der skrues den også til stødigere plater.



Figur 33: Modellen til lokkets overside



Figur 34: Modellen til lokkets underside limt og ferdig pusset.

3.5 Støping

Det ble gjort støp og verifikasjonstesting av det nye designet. Begge deler ble gjort ved Ulefoss sitt støperi i Ulefoss. To kasser ble formet ved hjelp av modellene som ble sendt nedover. Støpeformene tilvirkes av kvartssand med bentonittherder i håndformingsverkstedet. Ved tilvirkning av den første formen ble modellen av lokkets underside løftet opp og ut av formen ved hjelp av monorail og løfteører festet til modellens underside. Dette kan ha ført til at modellen har beveget seg til en av sidene. Deler av sandformen knakk og måtte limes som vist på Figur 35.



Figur 35: Knekt sandform.

Ved tilvirkning av den andre formen ble hele kassa løftet og modellen ble forsiktig sluppet ut av sanda. Dette ga bedre resultat uten knekking.

Nedløp og horisontalt løp ble formet i overkassa. Løpkulp med kort løp og innløp ble formet i underkassa. Filter ble plassert rett under nedløpet, over løpkulpen. De tre innløpene ble filt for hånd. Løpkulp, kort horisontalt løp, filter og filte innløp vises til på Figur 36. Etter kjerner til spetthull var på plass ble kassene plassert oppå hverandre ved hjelp av monorail. Styring i modellene skulle sørge for at det ikke ble noen partforskyvning. Dette virket til en viss grad. Styringen ville fungert mye bedre om den var høyere. Høyden ble begrenset av platematerialet modellene ble tilvirket av.



Figur 36: Løpsystem (t.v.) og overkasse med kjerner(t.h.).

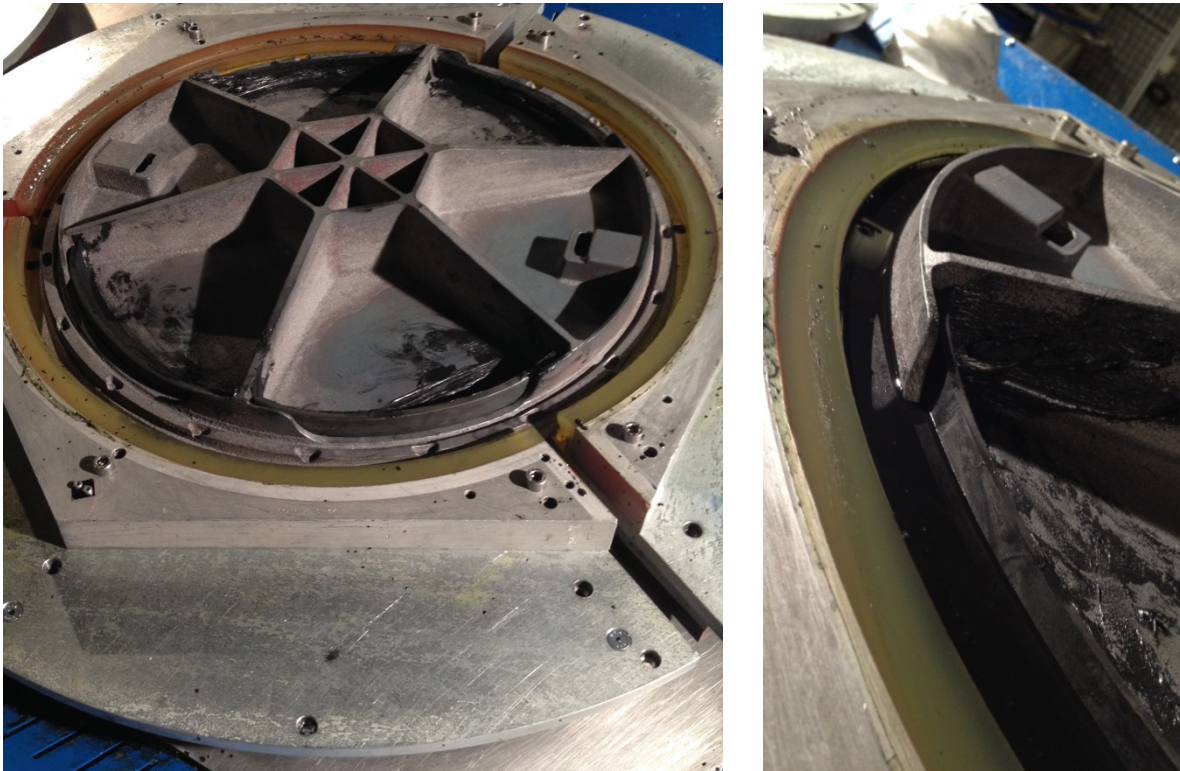
Kuper med smelte ble hentet fra smelteovnen med truck og hengt opp i monorail som vist på Figur 37. Deretter ble smelten helt ned i formene. Hellingen ble gjort så jevnt som mulig. Det ble tilsatt ympemiddel i strålen ved helling over i liten kupe som ble fraktet til håndforming.



Figur 37: Kuper med smelte.

Lokkene ble liggende i sanda over natta (8 – 10 timer). Morgenen etter ble de slått ut av formene og rensset rene for sand før løpsystem ble maskinert vekk.

Lokkene ble utstyrt med gummlist for å forhindre at polyuretanpakningen rant ned på lokkets underside. Med denne på plass fikk lokkene påstøpt pakning som vist på Figur 38. Dette skjedde i rammer tilpasset diameteren til NSTVL-lokk ved hjelp av robot. Flytende polyuretan og herder ble blandet i en dyse og helt ned i mellomrommet mellom ramma og lokkets skjørt og gummlist. Gummien herdet på noen minutter.



Figur 38: Støping av polyuretanpakning.

Pakningens høyde skal være 30 ± 0.5 mm. Dette ble kontrollert etter påstøping og godkjent. Med pakning på plass var lokkene klare for testing.

3.6 Testing

Testing av de to støpte lokkene ble gjort i henhold til retningslinjer i NS-EN 124, beskrevet i denne rapportens avsnitt 1.2.1. Lökkene ble plassert i en ramme som tilsvarer den de vil ligge i i gata, og belastet først fem ganger med 266.67 kN, så en gang med 400 kN. Et av lokkene gjennomgikk hele testen. Det andre lokket ble presset til det oppstod en sprekk. Testtriggen lokkene ble testet i er vist på Figur 39. Belastningen ble påført ved hjelp av et hydraulisk stempel.



Figur 39: Testtrigg.

Lokket som ble presset til brudd ble kappet opp, og prøver for å studere mikrostruktur i bestemte områder ble tatt ut. En oversikt over prøvenes plassering vises på Figur 40



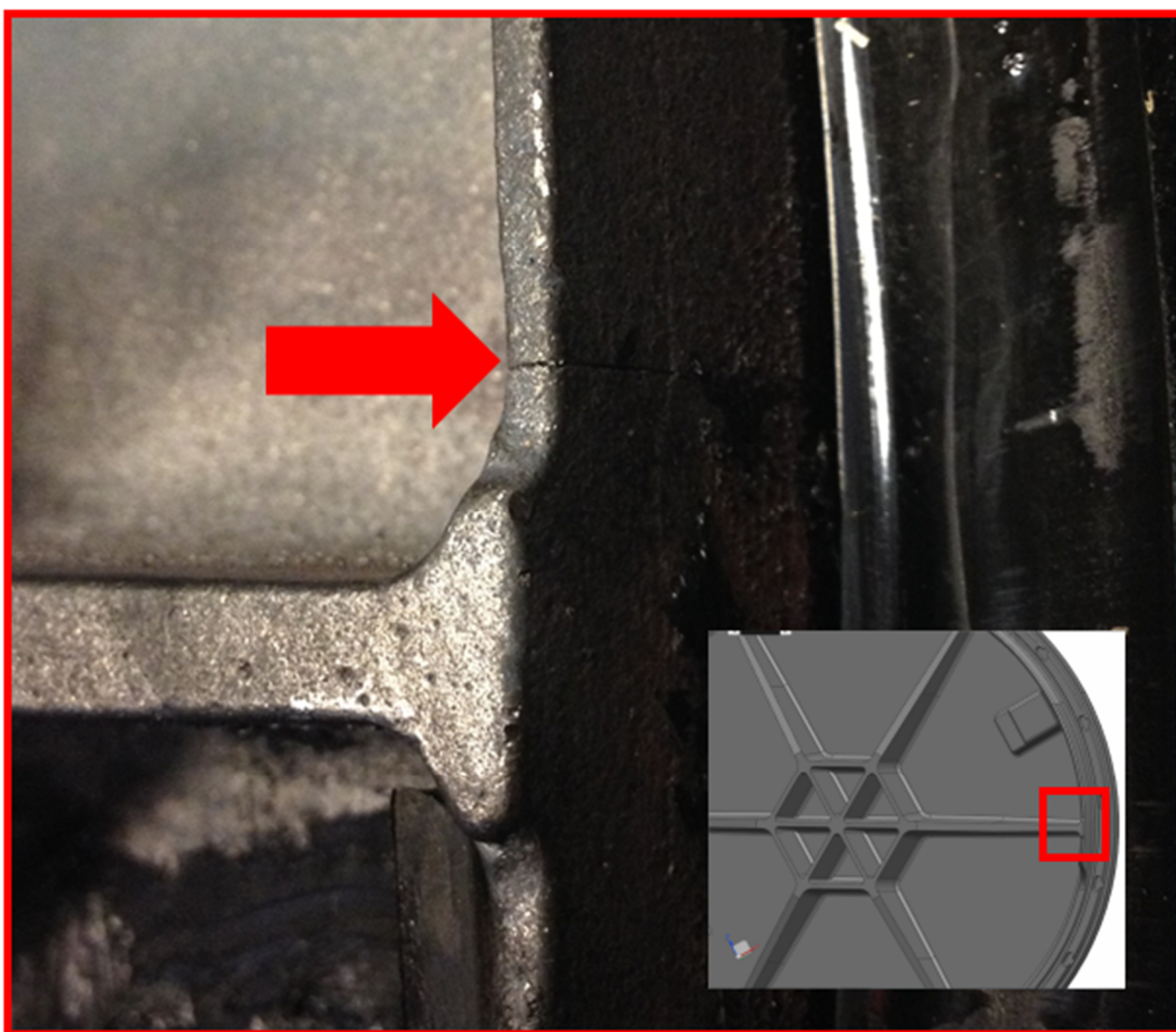
Figur 40: Oversikt over kapping

4 Resultater og diskusjon

Dette kapittelet er tredelt. Først betraktes resultater av testing av støpte lokk og simuleringer knyttet til dette. Så betraktes resultater av simuleringer av automatisk produksjon. Til slutt blir støpet av det nye designets vekt betraktet og sammenlignet med vekta av nytt design og NSTVL målt i NX 8.

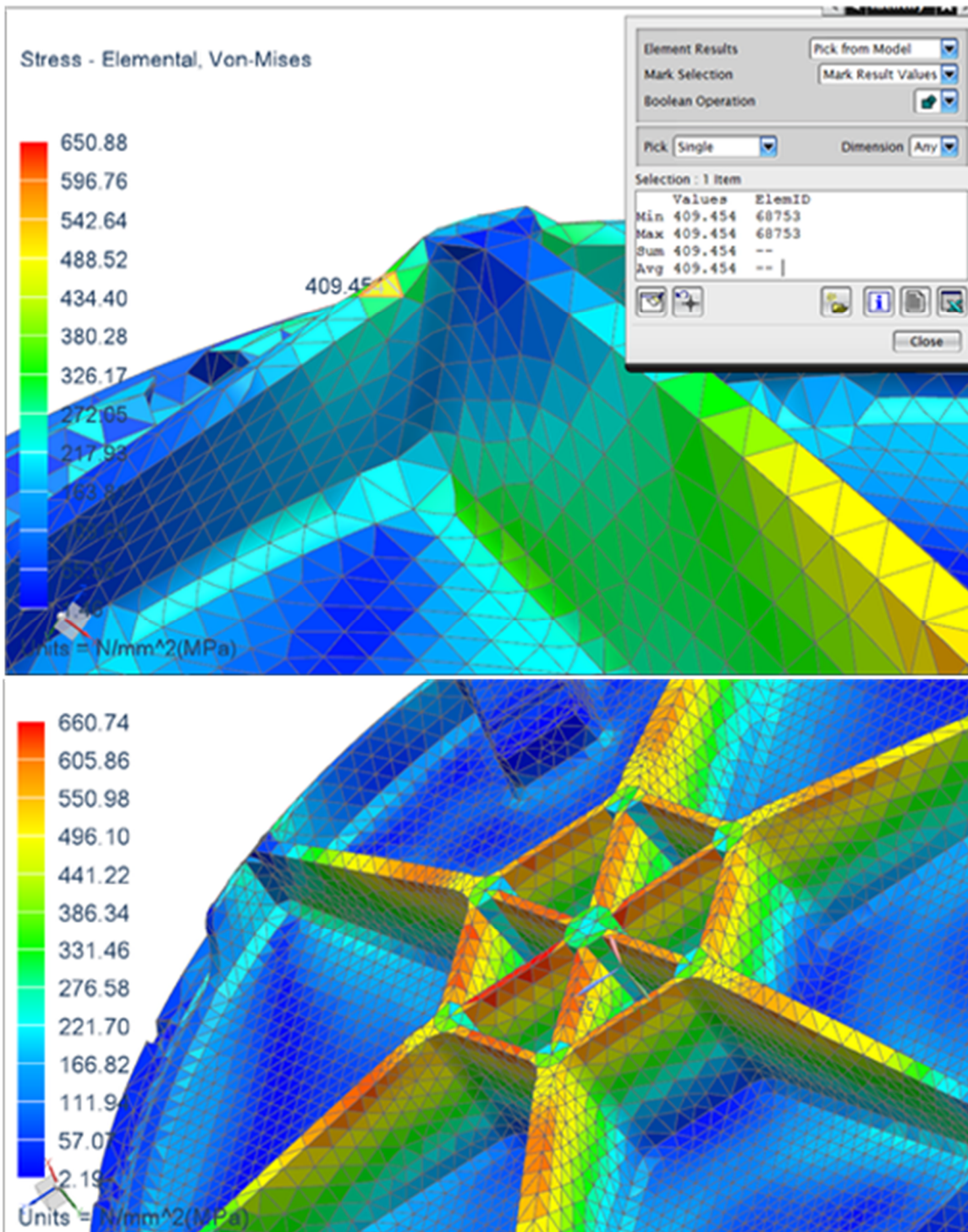
4.1 Testing av støpte lokk

Ved testing av lokk ble et av lokkene testet i henhold til NS-EN 124, kapittel 8. Standardens krav til nedbøying ble overholdt. Etter fem ganger pålastning med 266.67 kN ble den varige deformasjonen målt til 0.25 mm. Belastning med 400 kN førte ikke til noen synlige sprekker, og lokket tilfredsstillte krav stilt i standarden. Det andre lokket ble presset til en sprekk utviklet seg, og lokket gav etter. Dette skjedde ved en belastning på ca. 550 kN. Sprekken hadde utviklet seg i skjørtet i nærheten av overgangen fra en av ribbene som vist på Figur 41. Det støpte lokket ble veid inn til 39.2 kg inkludert pakning.



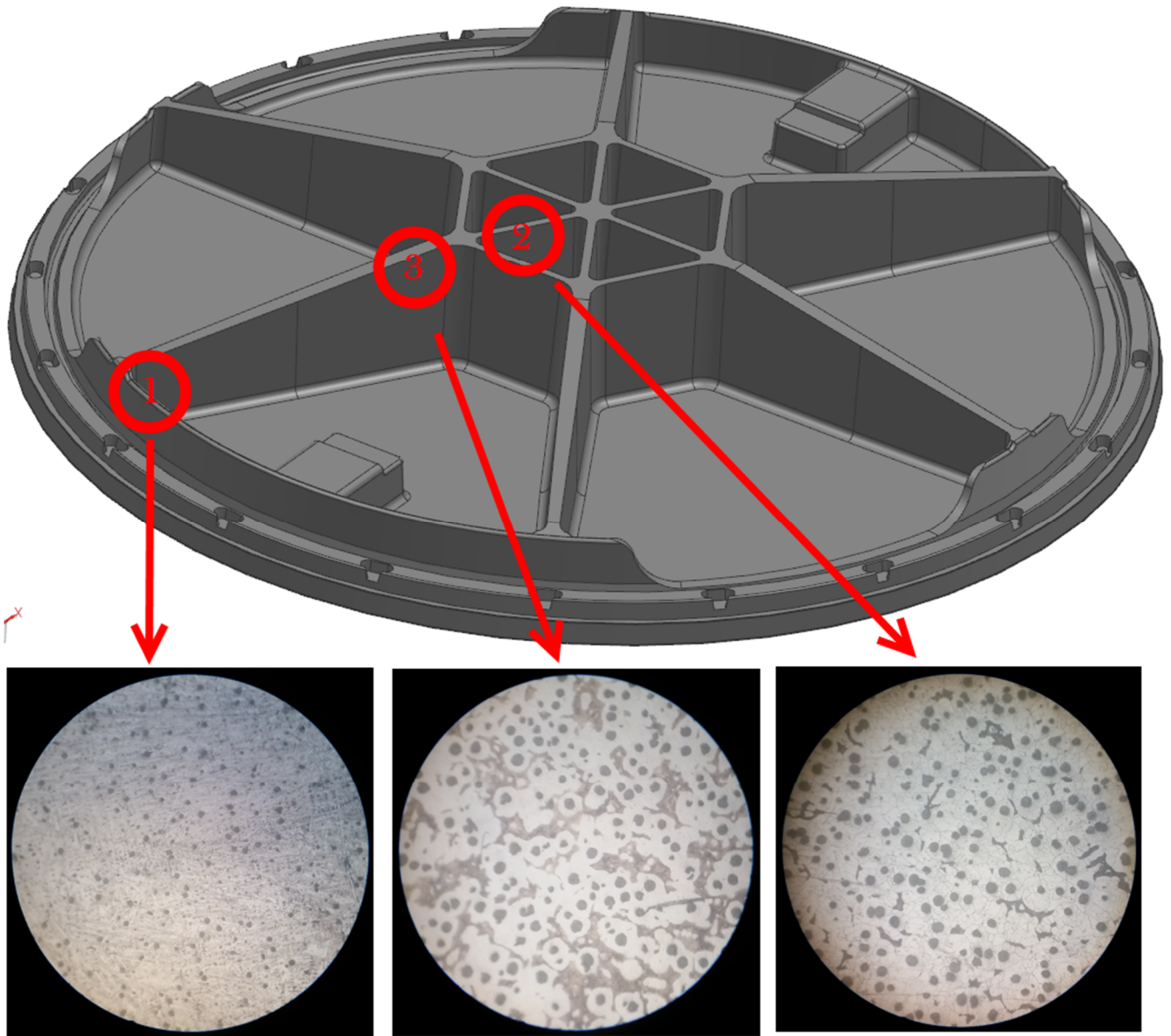
Figur 41: Sprekk i lokkets skjørt etter belastning på 550 kN.

Etter støpingen og testingen ble det gjort nye simuleringer i NX8 i et forsøk på å forstå hvorfor lokkets bæreevne viste seg å være såpass mye høyere enn antatt. For å undersøke om geometriske forhold eller endringer i grensebetingelser kan ha vært noe av grunnen var de nye simuleringene i NX statisk ikkelineære. Betraktning av spenningsplott etter belastning på 550 kN, vist på Figur 42, gir ingen umiddelbar forklaring på hvorfor lokket tålte mer enn forventet. Resultatene viser spenninger på rundt 410 MPa i overgangen mellom ribber og skjørt der sprekken utviklet seg, og 650 MPa i ribber i midten.



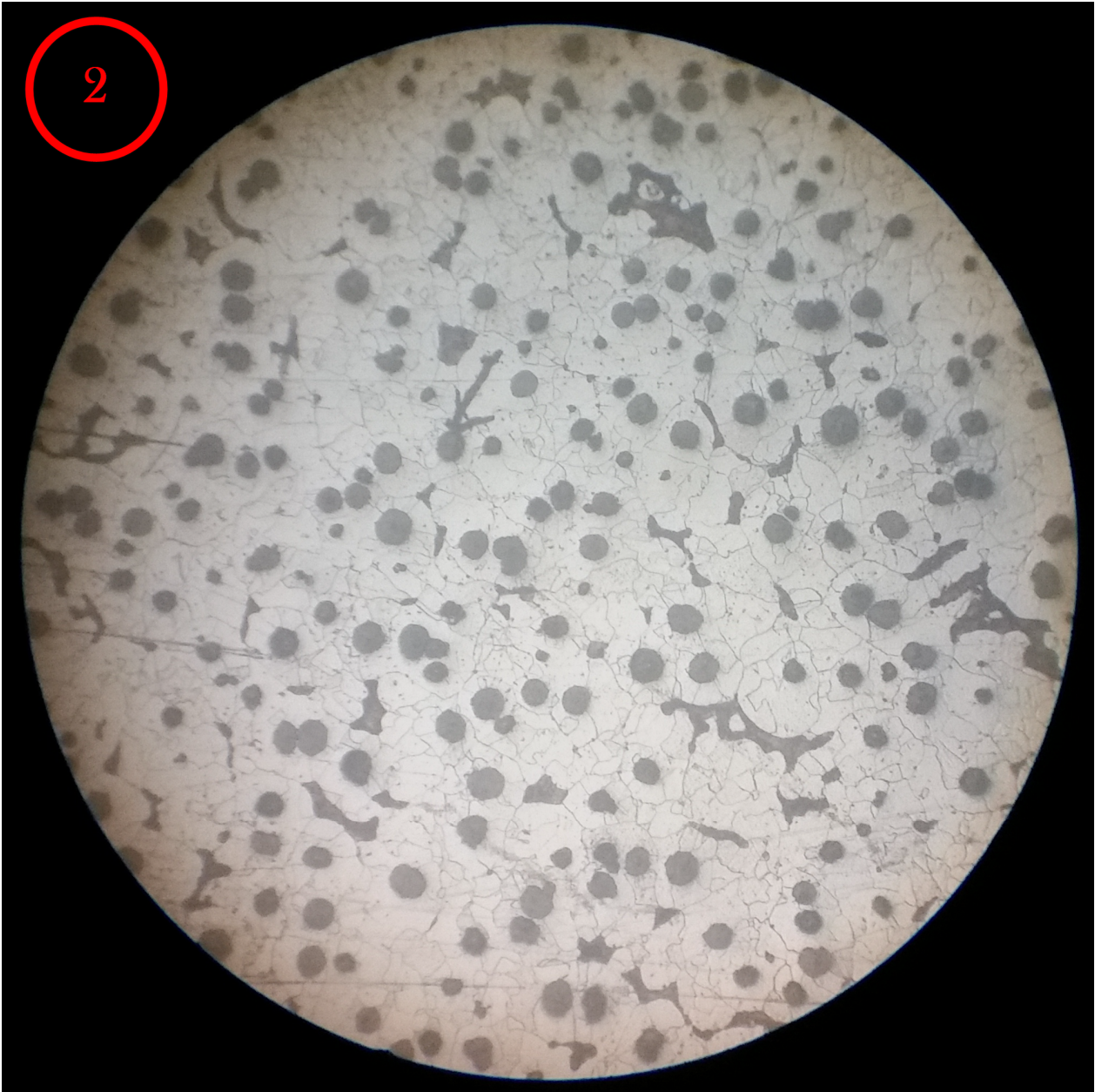
Figur 42: Spenninger ved belastning på 550 kN.

Grunnen til at lokket ikke gav etter før ved en belastning på 550 kN kan forklares ved mikrostrukturen i lokkets forskjellige tverrsnitt. Figur 43 viser en oversikt over kapp av lokk studert i mikroskop. Prøve 1 ble kappet ut av skjørtet der sprekken oppstod. Prøve 2 ble kappet ut av en av ribbene i midten av avstiveren, og prøve 3 ble kappet ut av undersiden til en av ribbene, helt inne ved avstiveren



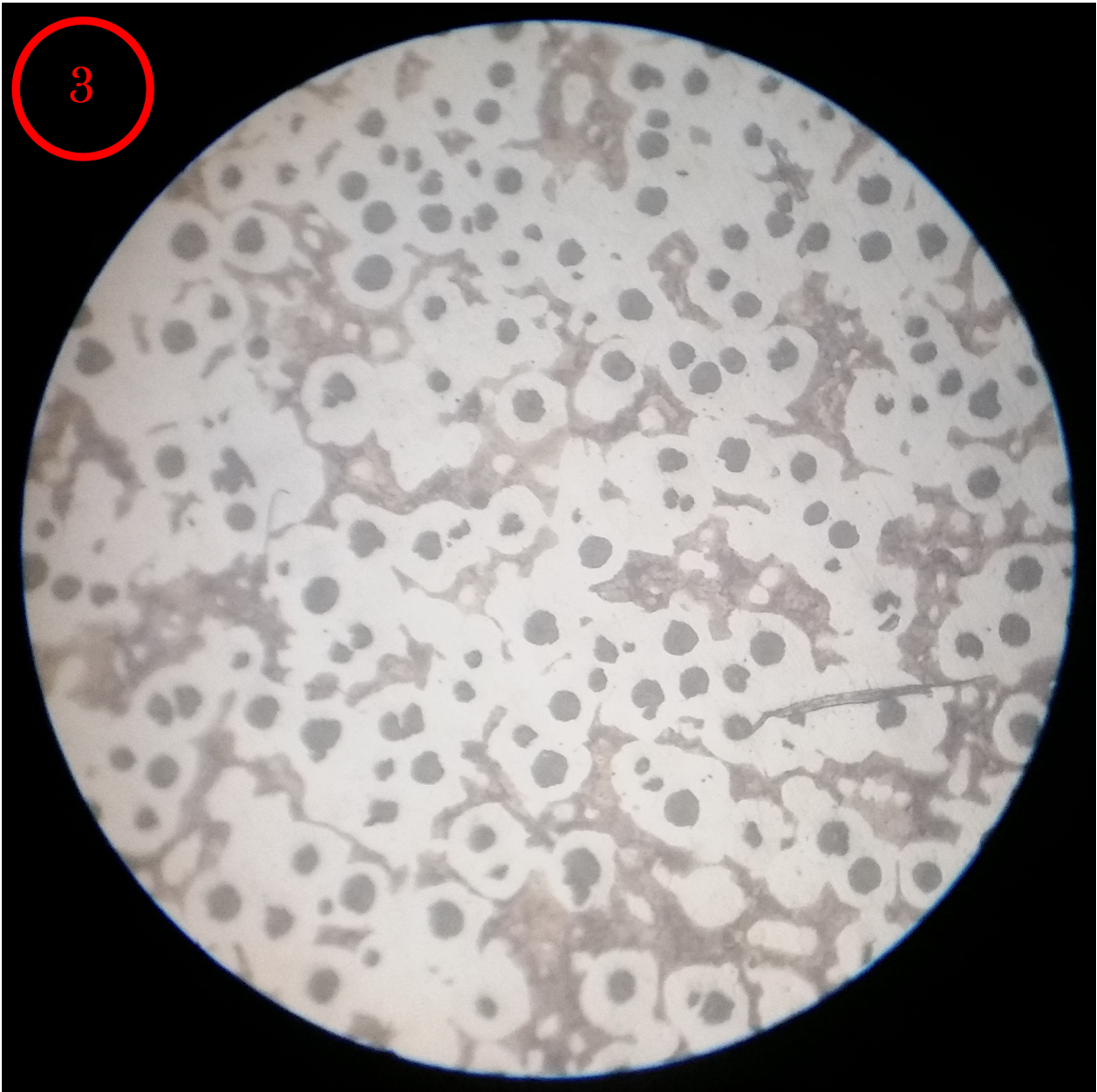
Figur 43: Oversikt over kapp av lokk studert i mikroskop

Slip av prøve 2 (Figur 44) viser en mikrostruktur med en høy andel ferritt. Den høye andelen ferritt begrunnes med at det i denne delen av støpet dannes et varmesenter. Når de seks ribbene i avstiveren og avstiveren selv fylles med smelte og størkner vil det avgis mye varme. Dette gjør at sanda forblir varm lenge, og avkjølingshastigheten rundt 727 °C er lav. Mye av karbonet rekker å diffundere inn til grafittnodulene.



Figur 44: Prøve 2

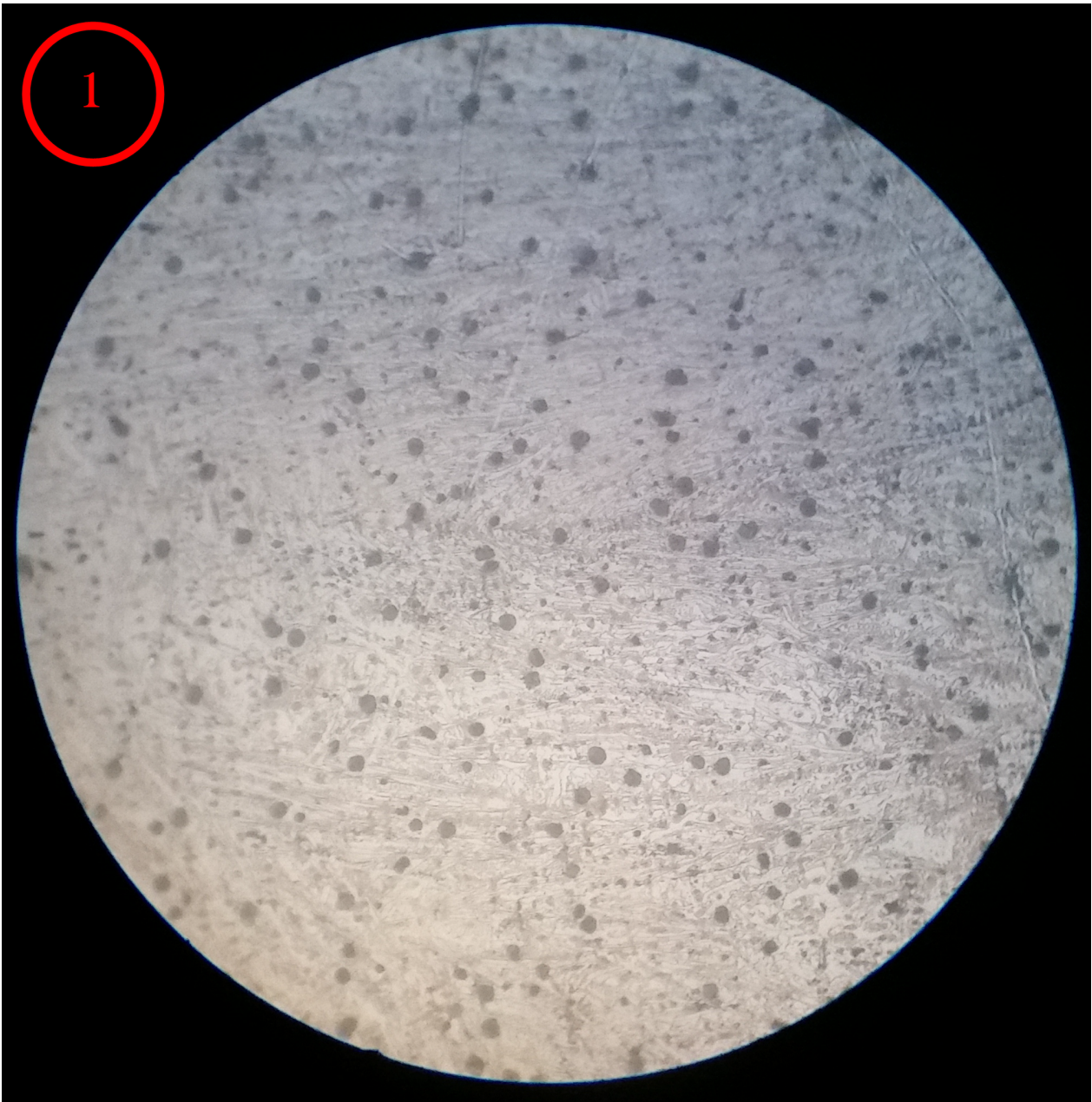
Slip av prøve 3 (Figur 45) viser en mikrostruktur bestående av en høyere andel perlitt. Perlitten består av ferrittkorn som har vokst rundt grafittnodulene, og sementitt som dannes mellom disse. I dette området av støpet vil fcc-strukturen til austenitten fortsatt vært overmettet med karbon når temperaturen der dannelsen av perlitt begynner nås ved 727 °C. Godset avkjøles hurtigere her enn nærmere lokkets sentrum, og mindre karbon diffunderer inn til nodulene. Det dannes sementitt rundt ferrittkorna.



Figur 45: Slip av prøve 3.

Denne perlittiske mikrostrukturen kan ha kommet av forskjellige ting. Smelten var dårligere ympet ved støpeforsøk enn det som ble antatt ved simulering, og tettheten grafittnoduler var lavere. En annen mulig årsak er at sanda brukt ved håndforming har andre varmeledningsegenskaper, og at smelten har blitt hurtigere nedkjølt.

Figur 46 viser karbider i lokkets skjørt. Jernet her er sprøtt



Figur 46: Slip av prøve 1.

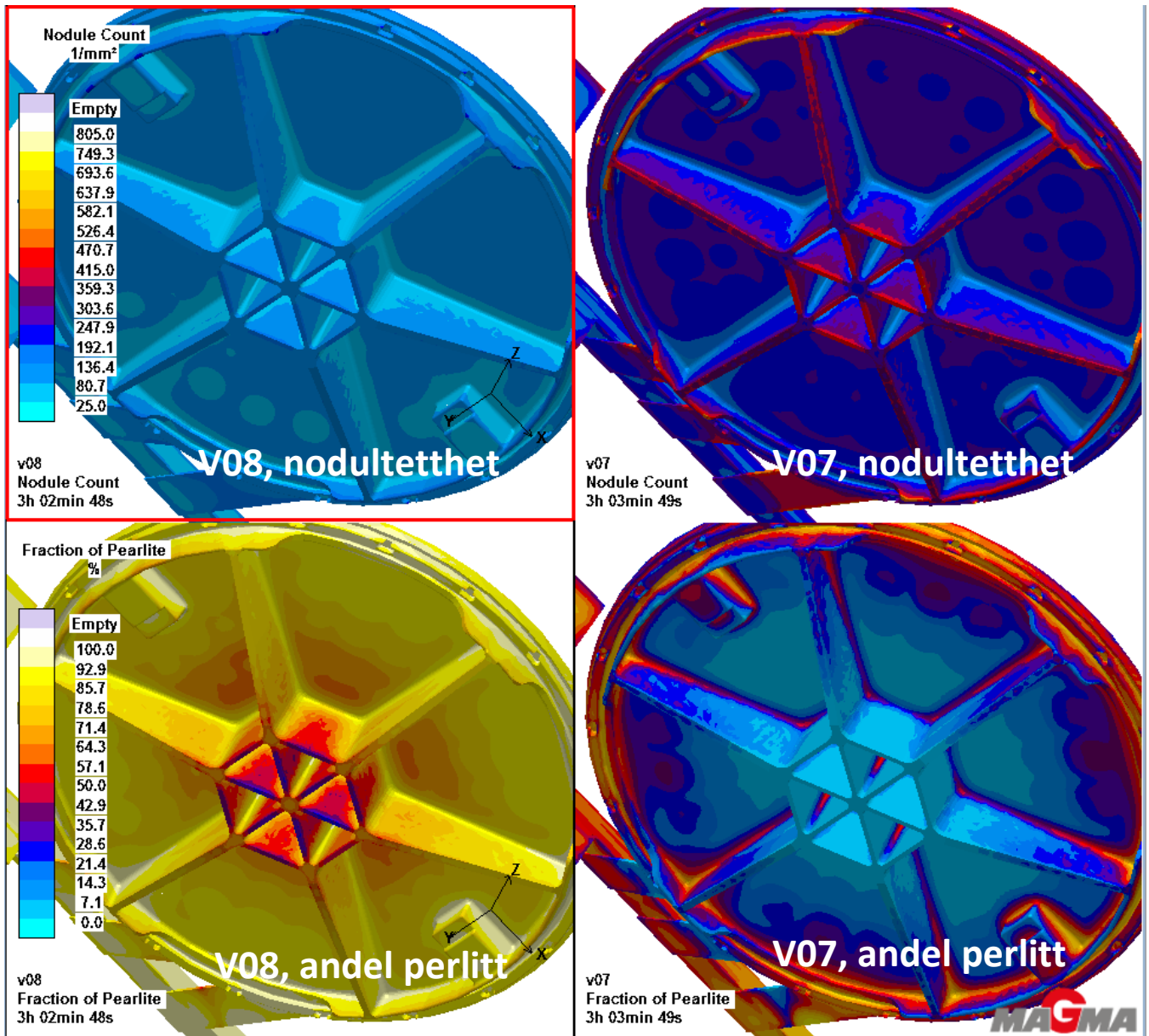
Årsaken til at lokket sprakk der det gjorde var materialegenskapene til jernet i dette området. Ved å studere bilde tatt av prøven kappet fra dette området av lokket kommer det frem at det her var stor forekomst av karbidet sementitt. Dette gjorde jernet sprøtt. Kombinert med en spenningskonsentrasjon på grunn av en uregelmessighet i overflaten antas den sprø sementitten å ha ført til utviklingen av sprekken. Den høye forekomsten karbider kan ha vært forårsaket av en for rask avkjøling. Godstykkelsen i området der sprekken utviklet seg er relativt liten. En måte å unngå dannelse av karbider her er å sørge for at smelten renner forbi dette partiet og ut av støpet. På denne måten vil sanda i området rundt det tynne godset bli varmet opp. Smelten som til slutt ender opp her og danner lokkets skjørt blir avkjølt langsommere. Dette vil kunne resultere i dannelsen av perlittisk mikrostruktur, i stedet for sementitt.

4.1.1 Støpesimuleringer i MAGMA5

Det ble gjort en rekke simuleringer i MAGMA5 der forholdene under prøvestøpingen ble forsøkt gjenskapt så nøyaktig som mulig. Ved å kjøre simuleringer med forskjellig grader ymping avdekkes det som nå antas å være årsaken til den høye andelen perlitt i mikrostrukturen. Smelten ved prøvestøpingen fikk tilsetning av ympemiddel i strålen ved helling fra stor til liten kupe. Før støpeformen kunne fylles måtte kupen fraktes inn på håndformingen og heises opp i monorail. Tiden mellom ympemiddelet tilsettes i strålen ved helling mellom kupene til smelten ble helt ned i formen antas å ha hatt stor påvirkning på ympingens effekt (11). Dette simuleres ved å modellere ymping i bunn av kupe i MAGMA5. «Melt treatment» settes til «fair – 100 %», i stedet for «good – 100 %». Sistnevnte tilsvarer tilsetning av ympemiddel i strålen ved fylling av støpeform (18). Endringen på hvordan ympingen ble simulert hadde stor påvirkning på mikrostrukturen, og lokkets gods endte mange steder opp med å bestå av veldig høye andeler perlitt. Gjennomsnittlig strekkfasthet havner i området rundt avstivere i midten på omtrent 650 MPa.

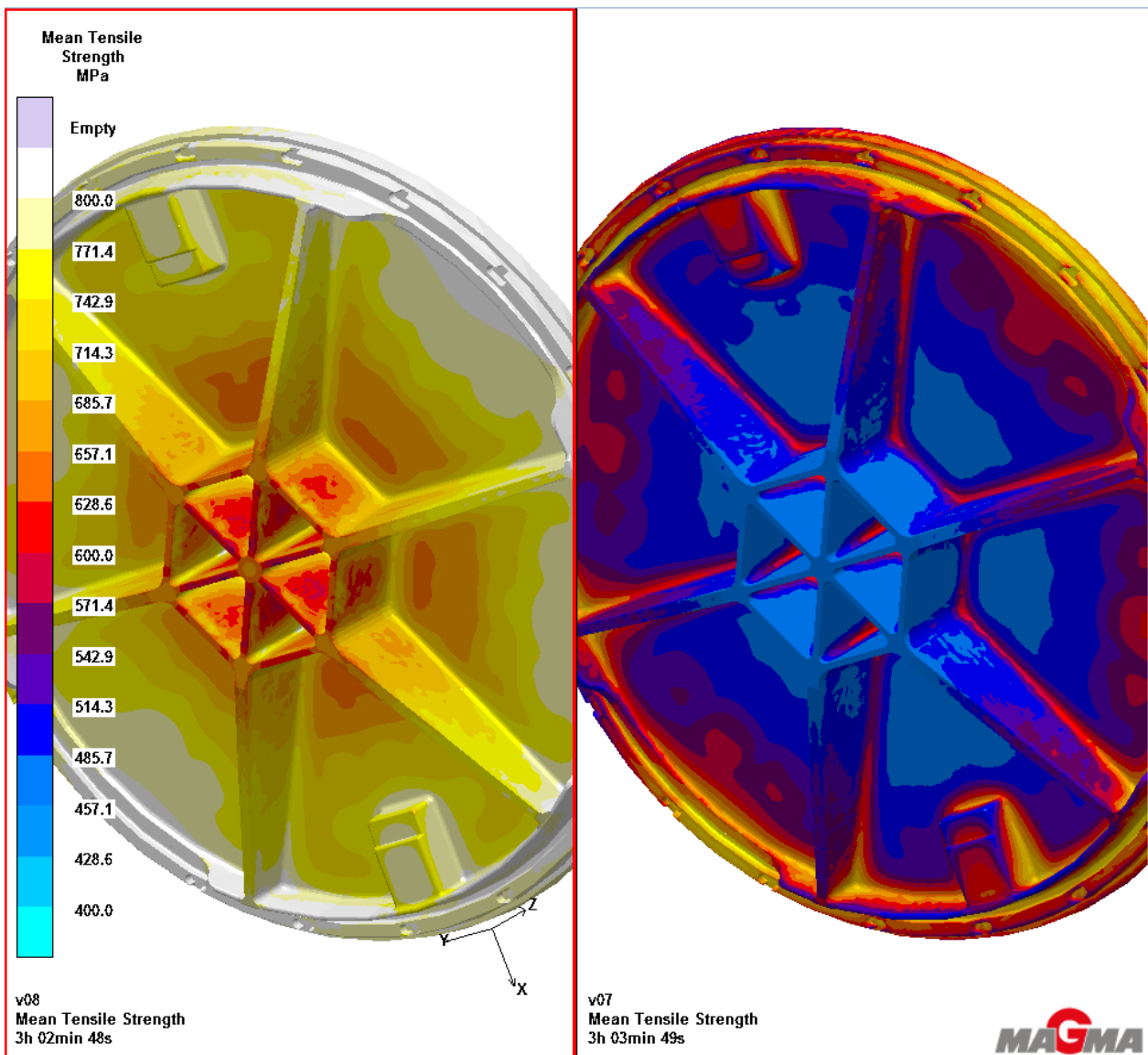
Fyllingen av støpeformen simuleres med helling ved 1350 °C. Dette skal tilsvare temperatur ved helling fra en kupe som ikke er forvarmet og antas å påvirke dannelsen av sementitt i området der sprekken utviklet seg. Avkjølingshastigheten i disse områdene er interessant. Springer av smeltens løp inne i støpeformen studeres. Dette antas også å ha påvirket dannelsen av sementitt.

Figur 47 illustrerer ympingens påvirkning på dannelsen av perlitt. Simuleringen avbildet til venstre (v08) er gjort med ymping i bunn av kupen. Lokket får en grafittnodultetthet på 80-180 1/mm² og andelen perlitt i ribbene innerst mot avstiveren ligger på 70-80%. Ribbene i midten av avstiver har en noe høyere andel ferritt. Simuleringen avbildet til høyre (v07) er gjort med ymping i strålen, ved helling av smelte. I dette tilfellet får lokket en grafittnodultetthet på 300-470 1/mm². Mikrostruktur i ribber og avstiver vil med ymping i strålen stort sett bestå av ferritt. Simuleringen gjort med ymping i bunn av kupe gir resultater som stemmer godt overens med bilder tatt av slipte prøver gjennom mikroskop.



Figur 47: Ympingens påvirkning på dannelse av perlitt

Figur 48 viser gjennomsnittlig strekkfasthet i lokk støpt med tilsetning av ympemiddel i bunn av kupen (til venstre) og i strålen ved helling av smelte (til høyre).

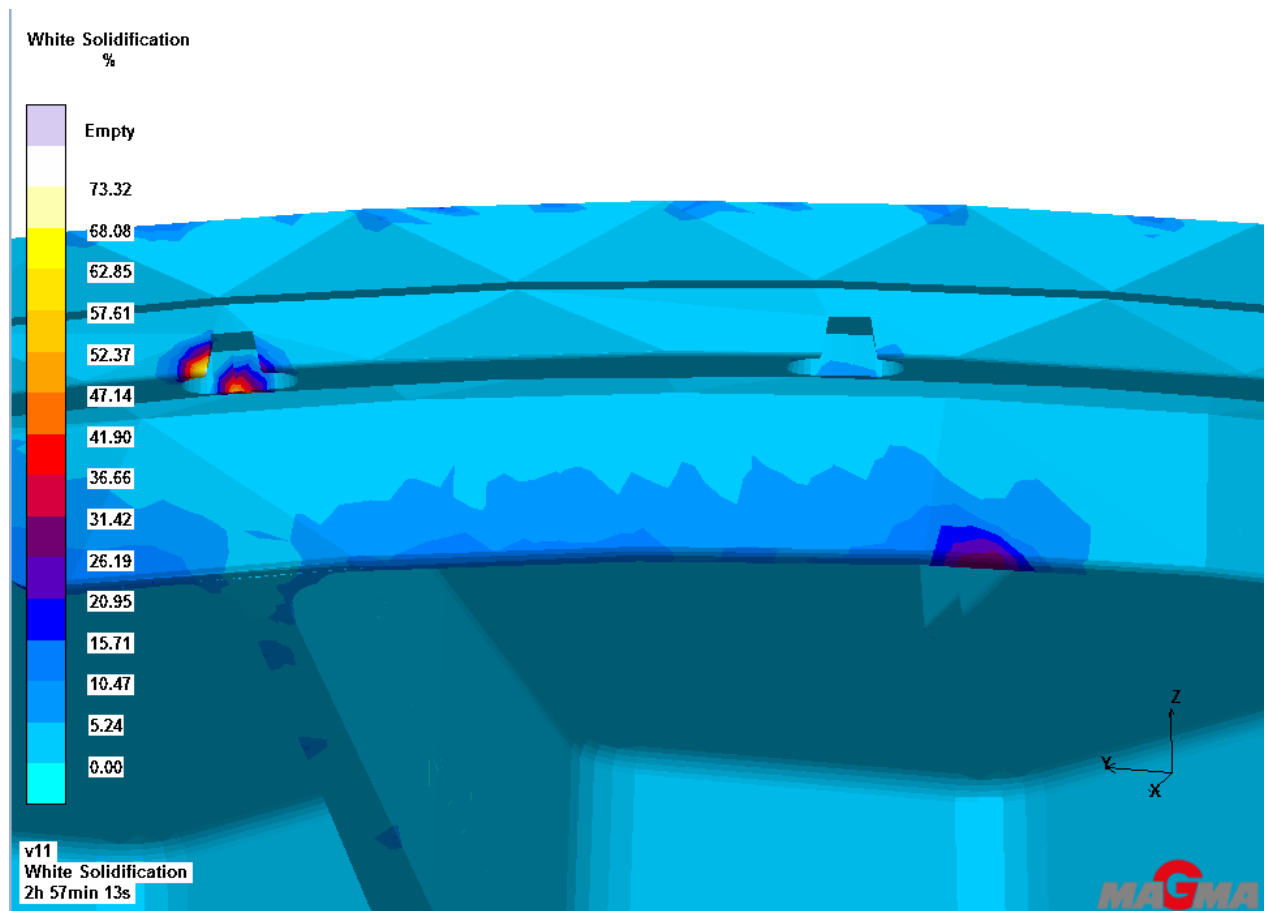


Figur 48: Strekkfasthet

Strekkfastheten i området der sprekken utviklet seg er i følge disse simuleringene på omtrent 750 MPa. Spenningene i dette området ved en belastning på 550 kN var ifølge analyser gjort i NX 8 på 410 MPa (se Figur 42). At det allikevel utvikles en sprekke her forklares ved at det har vært uregelmessigheter i støpets overflate. Disse har virket spenningskonsentrerende. Kombinert med sprøheten til materialet her (forårsaket av sementtittisk mikrostruktur) førte dette til utvikling av sprekke.

Som nevnt i 2.4 kommer dannelsen av sementitt av en rask avkjøling av smelten. En slik avkjøling er også forsøkt gjenskapt i simuleringer der smelten blir helt ved 1350 °C (anslått som den laveste realistiske temperaturen ved helling etter samtaler med Ulefos). Dette skulle tilsvare temperaturen i smelten ved helling hvis den ble helt fra en kupe som ikke var forvarmet.

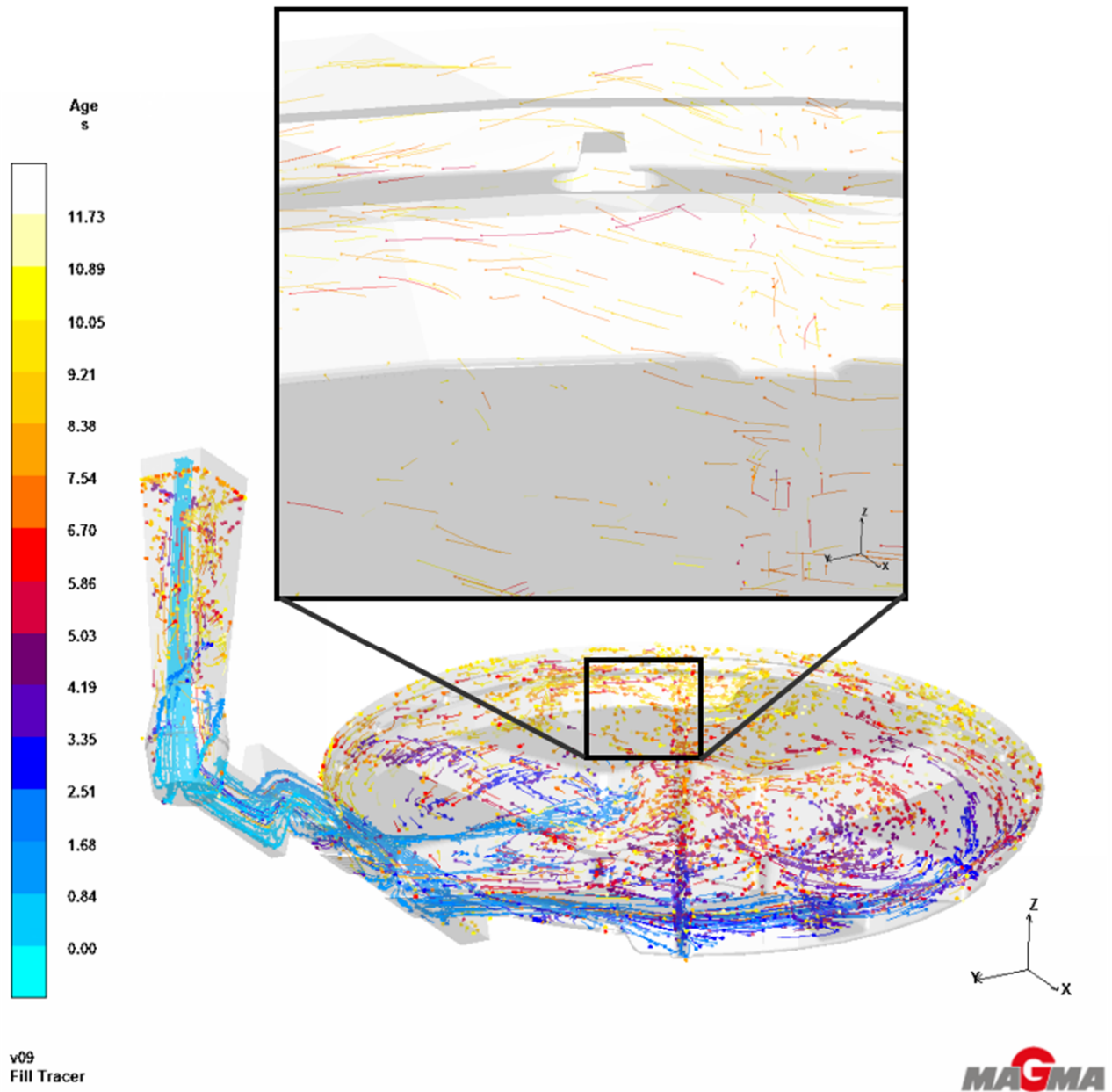
Ved simulering av helling ved 1350°C rapporterer MAGMA5 om dannelse av en mikrostruktur med opptil 10 % sementitt i området der sprekken utviklet seg. Dette er vist på Figur 49.



Figur 49: Sementitt.

Det er med vanskelig å si i hvilken grad resultater med hensyn til dannelse av sementitt stemmer overens med bilder tatt av mikrostruktur. Før dette kan sammenlignes bør prosentandelen sementitt i prøve kappet av lokket kan måles. Dette kan gjøres ved en analyse av bildet.

Ved å studere springer av smeltens bevegelser inne i formen (vist på Figur 50) kan man se hvor den eldste smelten ender opp. Denne smelten vil være litt kjøligere da den har varmet opp sanda den har kommet i kontakt med underveis. Skjørtet i området der sprekken oppstod bestod av mye «gammel» smelte



Figur 50: Springer av smeltens bevegelser

Dannelsen av sementitt i skjørtet begrunnes med at det samles mye gammel smelte her. Størkingen og avkjølingen i dette området skjer veldig raskt.

4.2 Støpesimuleringer i MAGMA5 - Automatisk produksjon

Det er gjort en rekke simuleringer i MAGMA5 med løpsystem som tilsvarer det som brukes ved masseproduksjon av lokk hos Ulefos i dag. Et av målene med det nye designet er at det skal være mulig å produsere på deres automatiske produksjonslinje. Det er gjort simuleringer både av NSTVL og det nye designet. Disse vil bli sammenlignet med hverandre. I simuleringene som etterlignet støping på automatisk linje ble låsearmene tatt med i modellen. Selv om de ikke påvirker lokkets bæreevne vil de påvirke formfylling og mikrostruktur. Det er også viktig å fastslå at jernet i låsearmene ble duktilt nok.

4.2.1 Fylling

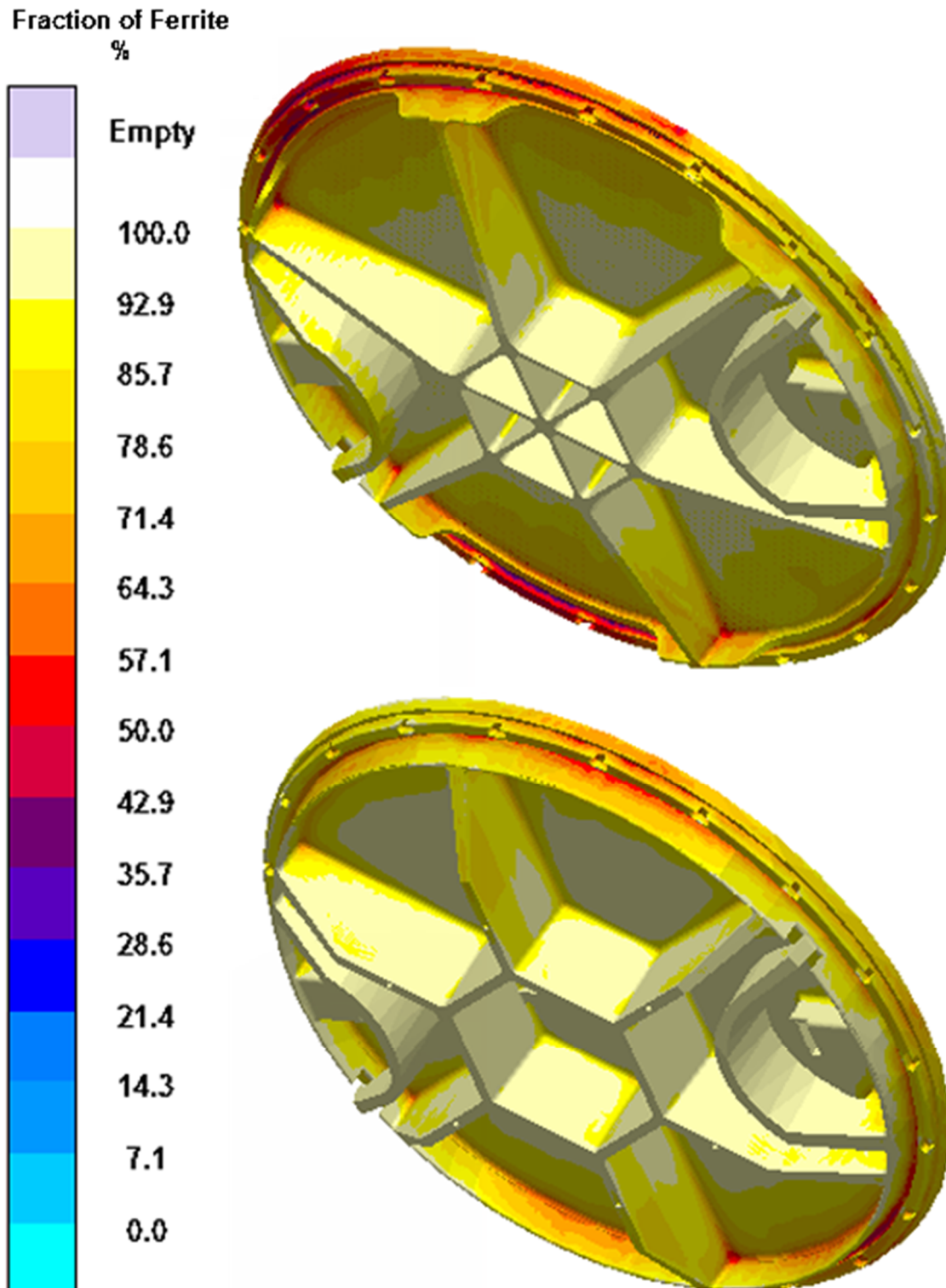
Hastigheten til smelten ved simulering av fylling har blitt studert. De høyeste hastighetene i vertikal retning ved fylling av ribber i nytt lokk var i størrelsesorden 0.04 – 0.07 m/s. Dette avviker i liten grad fra simulering av fylling av NSTVL. Hastigheten er lav nok til at eventuelt slagg eller partikler i smelten kan flyte til overflaten. Ved simulering av fylling av nytt lokk er det ved et av innløpene noe høye hastigheter. Sanda tatt i bruk ved simuleringene har i MAGMA5s databaser en kritisk hastighet på 2.25 m/s. Opptrer denne hastigheten på samme sted over 4.5 s. eller mer vil sannsynligheten for erosjon av form øke. MAGMA5 rapporterer at det ved støping av nytt design i overgangen mellom innløpet nærmest vertikalt løp og støpeformen vil kunne forekomme erosjon av sanda. MAGMA5 rapporterer også om erosjon ved fylling av NSTVL. Da de gamle lokkene til Ulefos er et nøye testet produkt uten feil knyttet til erosjon av støpeform og løpsystem blir disse resultatene sett bort ifra i denne omgang. De høye hastighetene i løpsystemet kan skyldes at målene (vinklene mellom horisontalt løp og innløp) det er modellert med ikke er helt korrekte.

Også med hensyn til innestengt luft og luftrykk i formen er det stor likhet mellom simuleringer av gamle og nye lokk. Permeabiliteten i sanda er høy nok, og problemer knyttet til luft og trykk inne i formen er ikke eksisterende.

Springer av smelten viser at skjørtet på motsatt side av innløpene både på nye og gamle lokk vil bestå av mye «gammel» smelte.

4.2.2 Avkjøling og mikrostruktur

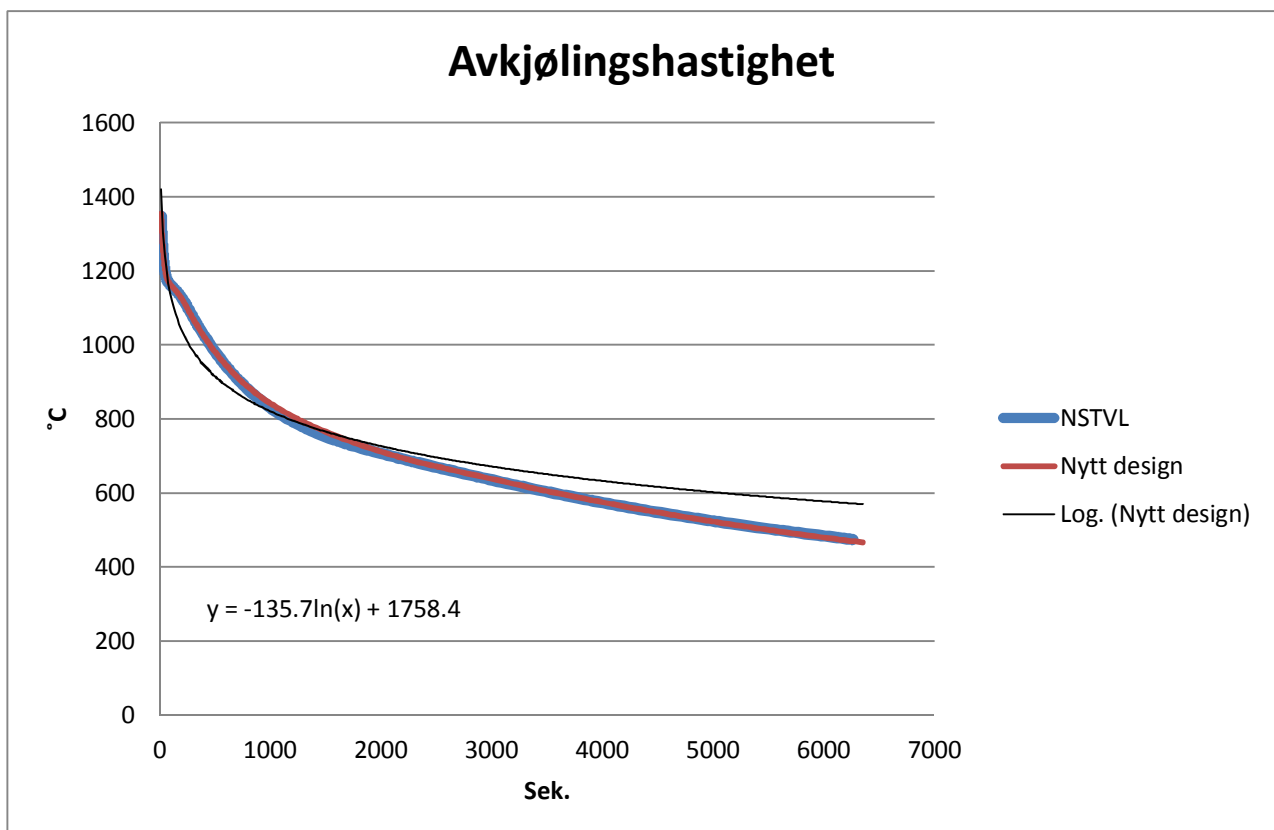
Illustrasjon av mikrostrukturen ved simulering av støp av nytt design og NSTVL er vist på Figur 51. Begge lokk har en mikrostruktur bestående av mye ferritt. Det som finnes av perlitt ligger langs lokkets kanter. Det vil dannes noe sementitt i lokkets skjørt. Andelen sementitt er meget lav og antas å være neglisjerbar.



Figur 51: Illustrasjon av mikrostrukturen ved simulering av nytt lokk og NSTVL.

Den høye andelen ferritt i lokkenes mikrostruktur kommer av en kombinasjon av flere ting. Graden av ymping (ympet i strålen ved helling av smelte) og den høye nodultettheten denne fører til (200 – 500 noduler/mm²) er en. En annen er den lave avkjølingshastigheten rundt temperaturen der ferrittkorna vokser.

Figur 52 viser gjennomsnittlig temperatur i nytt design og NSTVL som funksjon av tid. Begge lokkene har gjennomsnittstemperatur på omtrent 727 °C etter 2000 sekunder. Trendlinja «Log. Nytt design» har funksjonen $y = -135.7\ln(x) + 1758.4$. Den deriverte av trendlinja gir en tilnærming av tidsavhengig avkjølingshastighet. $\partial T/\partial t = -135.7/t$. Innsatt $t = 2000$ gir en lav avkjølingshastighet ved 727 °C på -4.07 °C/min.

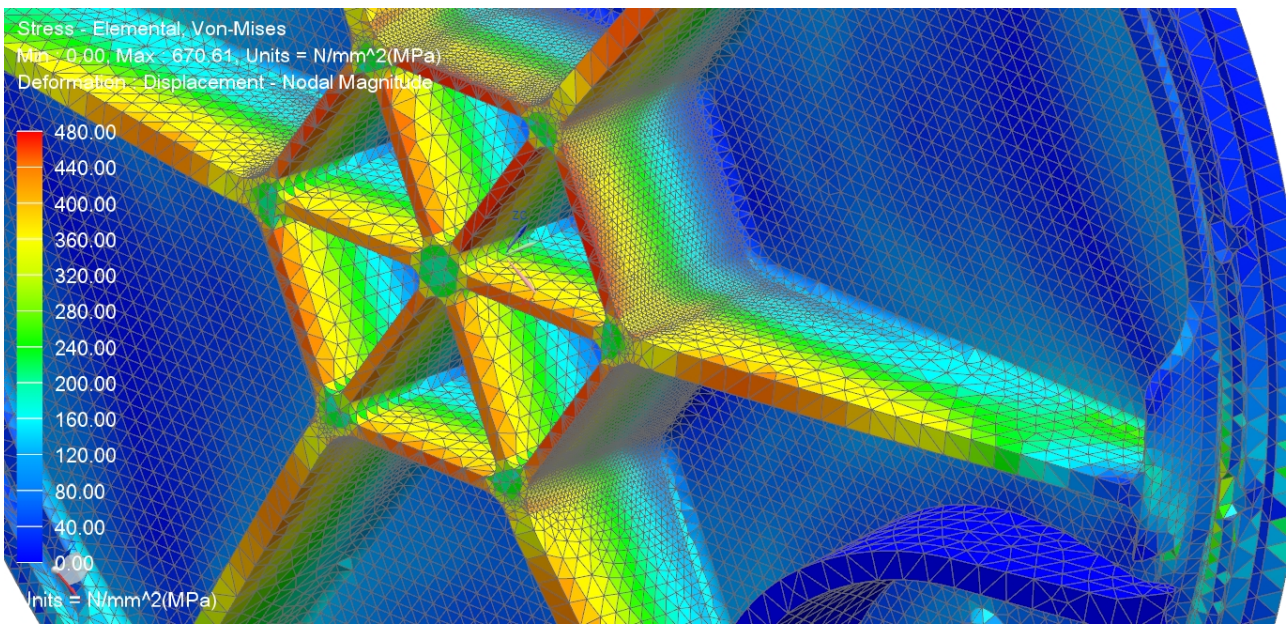


Figur 52: Avkjølingshastigheter

Den lave avkjølingshastigheten grunnes de termiske egenskapene i sanda. Det tar tid før varmen ledes vekk fra støpestykket. I tillegg er godset relativt tynt. Jernets kjemiske sammensetning er også avgjørende for det støpte godsets mikrostruktur.

Den høye andelen ferritt gjør jernet meget duktilt, og MAGMA5 melder om bruddforlengelser i ribber og avstiver på opp til 10 %. Bruddforlengelse i området der låsearmene kommer i bevegelse er på 9 – 10 % i det nye lokket og 10 – 12 % i NSTVL. Bruddforlengelse på 9 – 10 % antas å være tilstrekkelig. Jernet som danner avstiveren og ribbene i midten ender etter disse simuleringene opp med en gjennomsnittlig strekkfasthet på 493 MPa og flytegrense på 340 MPa. De høyeste spenningene som opptrer i lokket befinner seg i ribbene i midten og er på 479 MPa vist på Figur 53. Et jern med de mekaniske egenskapene disse simuleringene resulterer i vil tåle de belastningene det blir utsatt for under testing og bruk. Delen av lokket med de høyeste

spenningene er nederste del av de sekskantede avstiverene. Her er også den høyeste andelen ferritt.



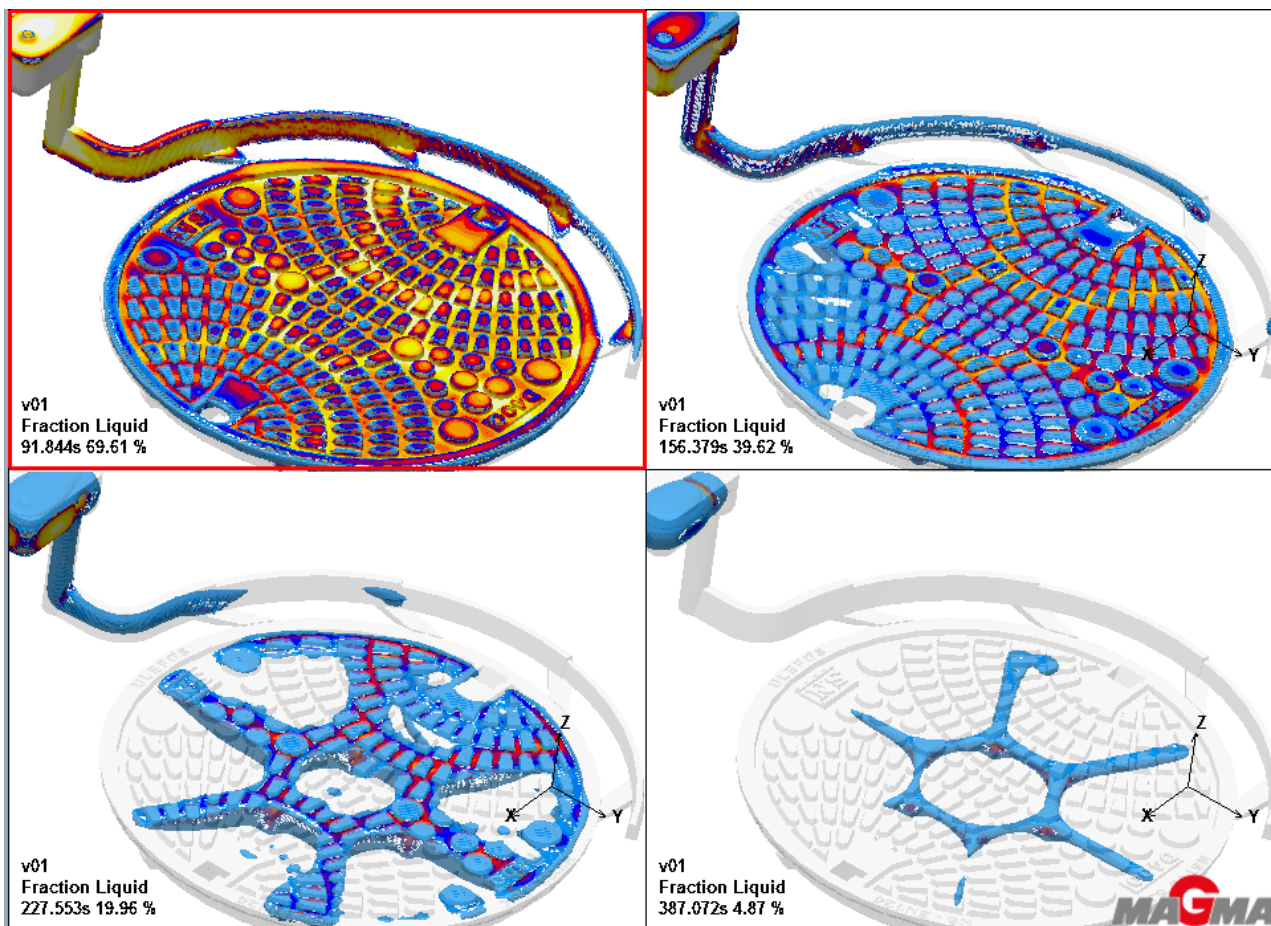
Figur 53: Spenning i avstiver

4.2.3 Feilmødi

Det ble brukt mye resurser på å studere resultater med hensyn til porøsitet, formfylling og dannelse av sementitt. Varmsprekking ble ikke vurdert til å være like relevant da seigjern krymper lite, og har et relativt kort størkningsintervall.

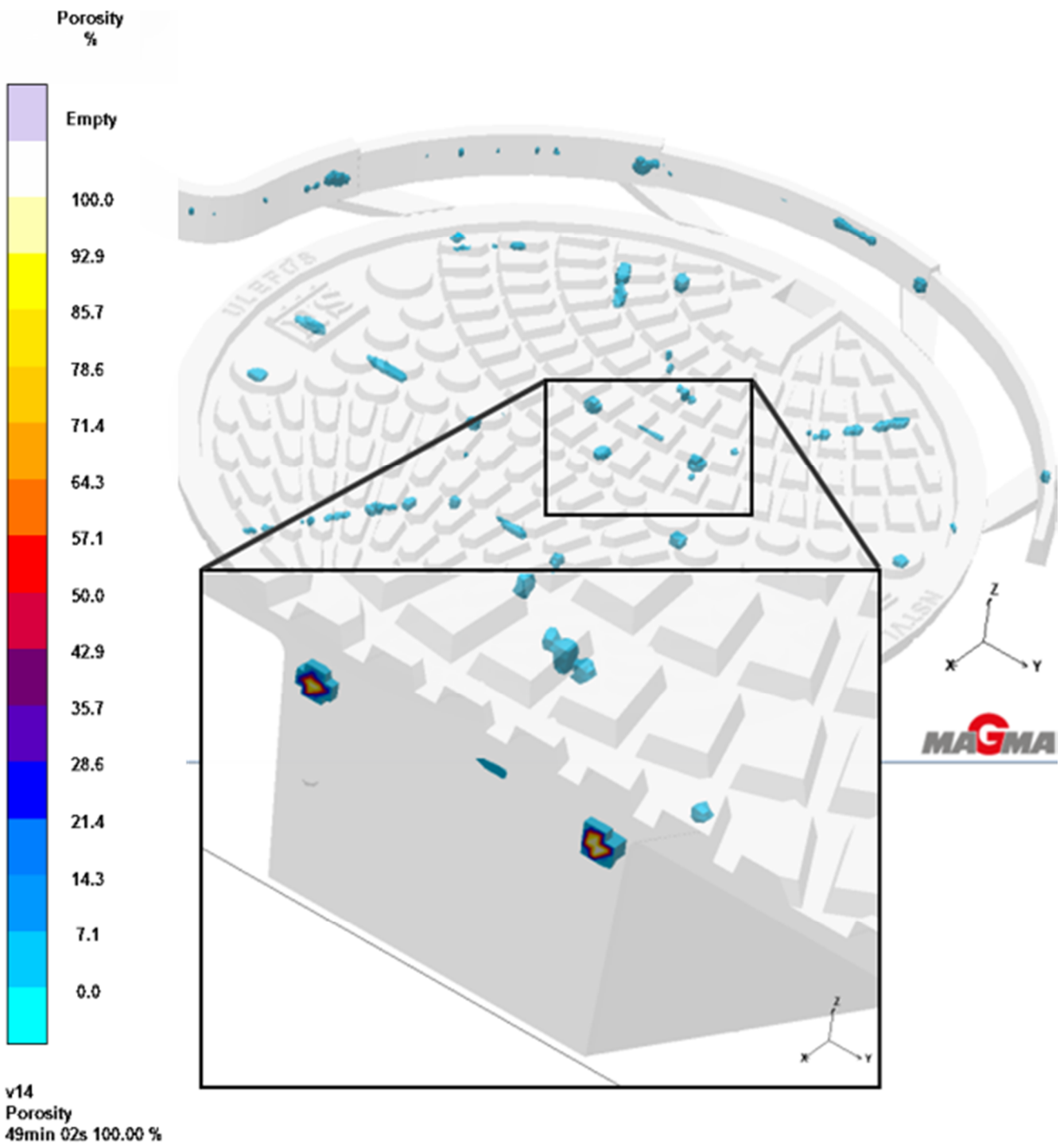
NSTVL

I Figur 54 er andelen av støpet som fortsatt er flytende og hvilke deler av lokket som størkner sist illustrert. Ved omtrent 90 s. størkner innløpene og støpet er helt uten mating. Det siste området som størkner helt er avstiverens og ribbenes øvre deler. Kulegrafitten i seigjernet sørger for minimal krymp. Allikevel vil det her bli noe porøsitet.



Figur 54: Størkning av NSTVL

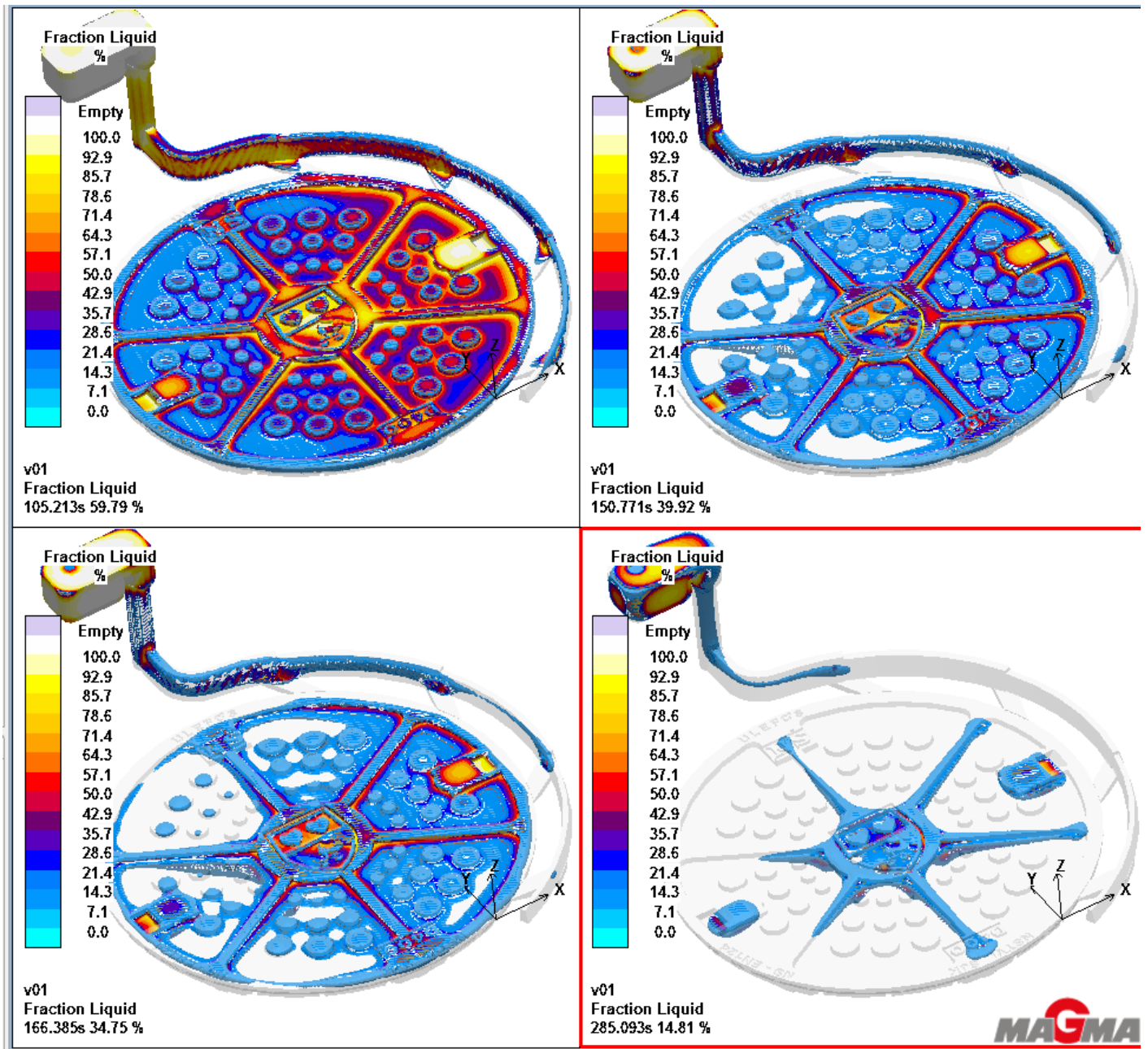
Figur 55 illustrerer porøsiteten i NSTVL. Forekomst av porøsitet er størst i lokkets øvre deler der spenningene er lave. Området med mest porøsitet er uthevet på figuren.



Figur 55: Porøsitet i NSTVL

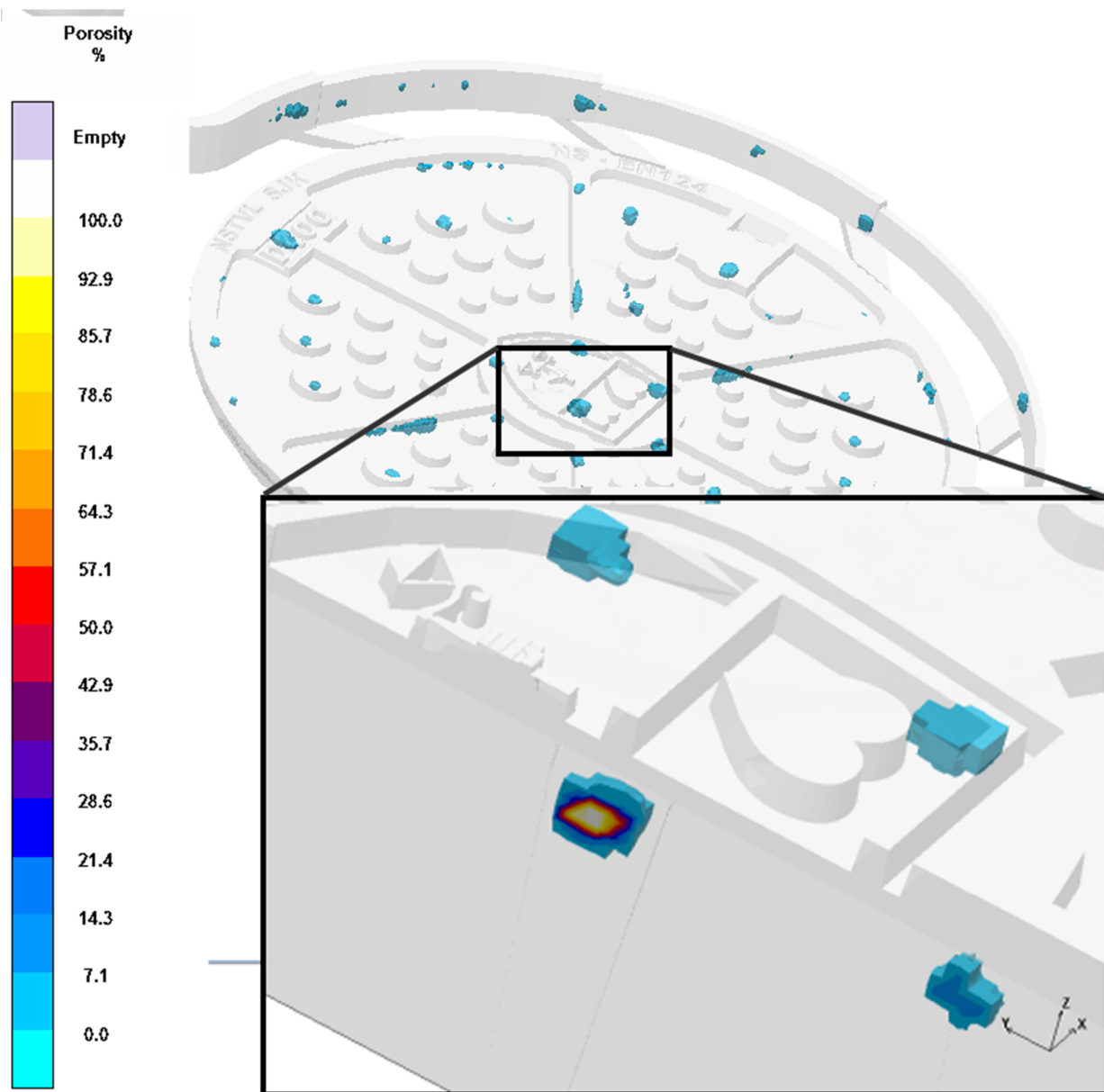
Nytt design

Figur 56 viser andelen av støpet som fortsatt er flytende og hvilke deler av lokket som størkner sist. Ved omtrent 90 s. størkner innløpene og støpet er helt uten mating. Det siste området som størkner helt er avstiverens øvre del. Kulegrafitten i seigjernet sørger for minimal krymp. Allikevel vil det her bli noe porøsitet rundt ribber og avstivers øvre deler.



Figur 56: Størkning av nytt design.

Porøsitet i det nye designet er vist på Figur 57. Det er noe porøsitet i ribbene og avstiverens øvre deler. Den største forekomsten av porøsitet er midt i lokket. Denne anses også som mest kritisk. Spenningene i dette området er relativt lave (i størrelsesorden 50 – 70 MPa).



v14
Porosity
49min 02s 100.00 %

Figur 57: Porøsitet i nytt design.

Simuleringer av begge lokk viser at det vil kunne komme til å bli noe porøsitet i toppen av ribbene og i midten av lokket. NSTVL har blitt masseprodusert i lang tid, så porøsiteten i dette lokket har neglisjerbar betydning. Det antas den å ha i det nye lokket og. Det er omtrent like mye porøsitet i dette. Spenningene i disse områdene er i størrelsesorden 50 – 70 MPa. Hadde porøsiteten blitt vurdert som mer betydningsfull kunne den blitt utbedret ved hjelp av en mater i midten av lokket.

Det nye designet simulert støpt på den automatiske linja har i motsetning til lokk simulert støpt ved håndforming nesten ingen forekomst av karbider i skjørtet eller andre steder. Årsaken til dette antas å være helling ved høyere temperatur, bedre ymping og et mer sofistikert løpsystem.

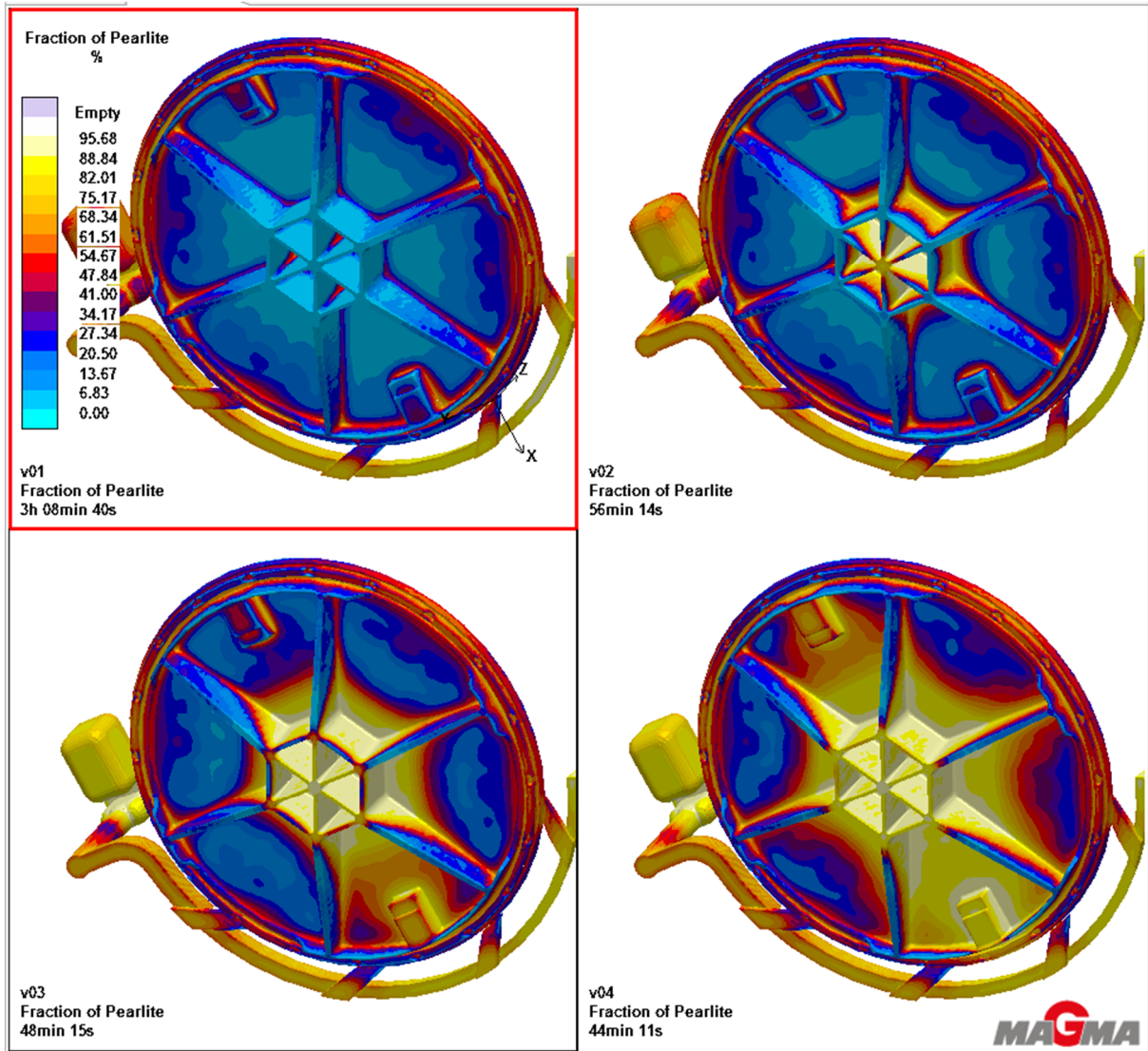
Ved produksjon av det nye lokket vil man kunne få noen støpetekniske utfordringer grunnet geometri. Som nevnt i kapitlet om metode (3.5) er det risiko for at sandsøylene som former ribber i midten av avstiveren knekker.

4.2.4 Shakeout

Som nevnt i 2.4.1 har avkjølingshastigheten rundt 727 °C mye å si for hva slags mikrostruktur man ender opp med i det ferdig støpte godset. Høyere avkjølingshastighet vil kunne føre til høyere andeler perlitt og høyere strekkfasthet. Ved å slå støpet ut av støpeformen kan man regulere avkjølingshastigheten. Shakeout er ikke nødvendig for at det nye designet skal tåle belastningene det utsettes for ved testing. Det har blitt studert som en interessant måte å påvirke lokkets mekaniske egenskaper på.

Det ble gjort simuleringer i MAGMA5 for å studere dannelsen av perlitt etter shakeout ved forskjellige tidspunkter. Simuleringene ble kjørt med løp som tilsvarer det som brukes på automatisk linje. Det ble satt opp flere versjoner. I den første versjonen (v01) ble det hentet ut data for hvilket tidspunkt støpet holder rundt 750°C i avstiverens ribber. Dette ble gjort ved hjelp av temperaturavhengig resultatdefinisjon der MAGMA5 rapporterer tidspunktene makstemperaturen i støpet faller under 1000, 900, 800, 700, 600 og 500 °C. Avstiveren ligger i temperaturområde rundt 750 °C ca. 40 min etter helling. I versjonene 2, 3 og 4 ble shakeout satt til henholdsvis 2400, 1800 og 1500 s.

Figur 58 viser andelen perlitt (fra oppe til venstre til nede til høyre) uten shakeout, ved shakeout etter 2400 s., 1800 s. og 1500 s. Den viser tydelig at avkjølingshastigheten rundt 727 C påvirker andelen ferritt i det ferdig støpte godset. Kornene rekker ikke å vokse seg like store som de ville uten shakeout. Tas lokket ut av sanda etter 1500 s. vil andelen perlitt i avstiveren være nesten 100 %, og strekkfastheten til jernet høyere.

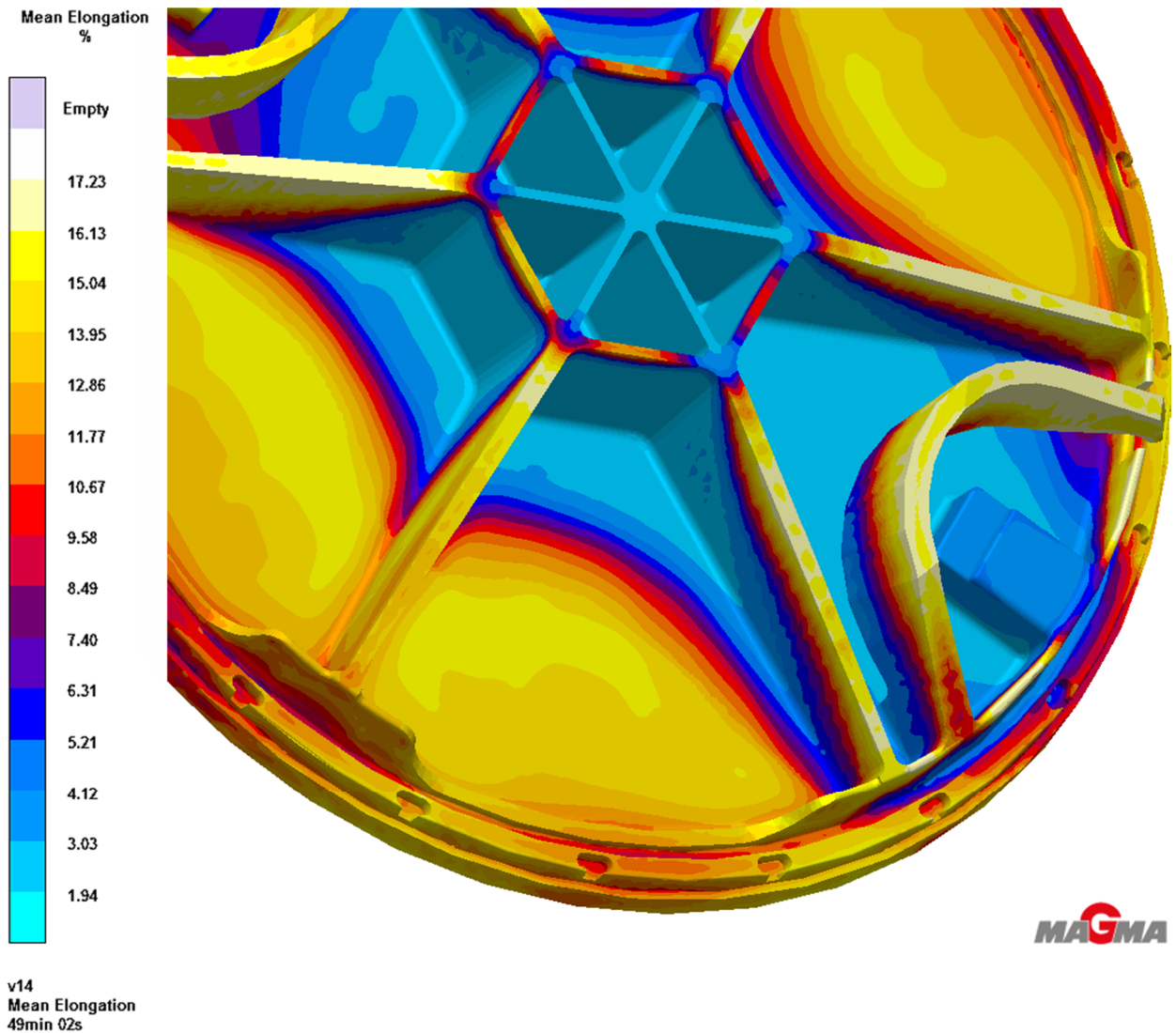


Figur 58: Andelen perlitt etter shakeout ved forskjellige tidspunkter.

Om det er praktisk gjennomførbart å slå ut lokkene ved tidspunkter nevnt her er usikkert. Resultatene er allikevel interessante da de illustrerer avkjølingshastighetens påvirkning på jernets endelige mikrostruktur. Per i dag er det ikke mulig å slå ut lokk støpt ved Ulefos sin automatiske linje før etter 2 – 3 timer.

En utfordring knyttet til å slå de støpte lokkene ut av sanda på denne måten er at materialet låsearmene består av kan bli for sprøtt. Materialets bruddforlengelse etter shakeout ved 1800 sek. er illustrert i Figur 59. For å unngå dette er det mulig å kombinere shake out med lokalt bedre ymping. Finknust ferrosilisium kan legges i støpeformen før helling (11). Gjøres dette i områder

der duktilitet er viktig (rundt områder der låsearmene bøyes) kan man slå ut støpet og dra nytte av en mikrostruktur med høyere andel perlitt der høy strekkfasthet er viktig samtidig som duktiliteten bevares der den er viktig.



Figur 59: Bruddforlengelse i nytt design etter shakeout etter 1800 sek.

4.3 Vekt

Dette avsnittet tar for seg vekta av lokkene, ikke løpsystemene. Arbeid med design av løpsystem ble som nevnt innledningsvis nedprioritert til fordel for arbeid med støpemodell og støping av lokk. Tabell 4 gir en oversikt over vekta av forskjellige modeller i NX og støpt lokk. Vekta i NX ble funnet ved å måle volumet av de forskjellige modellene og multiplisere det med massetettheten til EN-GJS-500-7, 7100 kg/m^3 , oppgitt i (3). Pakning er ekskludert fra alle massene. Den veier i følge Ulefos 1 kg (21).

Tabell 4: Oversikt over vekt.

Lokk	Vekt [kg]
Støp av nytt design	38.20
Nytt design uten låsearmen (NX)	39.95
Nytt design med låsearmen (NX)	42.85
NSTVL (NX)	48.58

Det kommer frem i Tabell 4 at faktisk vekt og beregnet vekt i NX ikke stemmer helt overens. Det er en differanse på 1.75 kg mellom vekta av det støpte lokket og NX-modellen av det. Denne differansen kan ha forskjellige årsaker, blant annet lavere tetthet i jernet, ulik geometri eller porøsitet i støpt gods. Vekta av det støpte lokket tilsvarer 95.6 % av vekta målt i NX. Gjøres antagelsen at forskjellen mellom støp og modell i NX forblir den samme vil det nye designet støpt med låsearmen veie 40.96 kg. NSTVL vil veie 46.44 kg og differansen mellom de to vil være 5.48 kg.

5 Oppsummering og konklusjon

Nytt og lettere design av kumlukk har blitt utviklet. Det har blitt gjort styrkeberegninger i NX 8 og simuleringer av støping i MAGMA5. Det ble tilvirket en modell av lokket, og gjort støp av det ved Ulefos Jernværk. Støpingen var en suksess og lokket tålte de belastningene det måtte for å være i henhold til NS-EN 124. Det nye designet er 5.7 kg (11.8 %) lettere enn NSTVL. I tillegg er det stivere enn NSTVL med en plastisk deformasjon på 0.25 mm etter belastning med fem ganger 266.67 kN.

Simuleringer av støping ved håndforming og simuleringer av støping på automatisk linje har blitt betraktet hver for seg. Dette er på grunn av relativt store forskjeller mellom en rekke avgjørende parametere (forhold rundt ymping, løpsystemets utforming og temperatur ved helling av smelte). Simuleringer i MAGMA5 med parametere som tilsvarer forholdene ved støping på automatisk linje tilsier at det nye designet vil tåle belastningene det utsettes for ved bruk og testing i henhold til NS-EN 124. Jernet ender i disse simuleringene opp med en strekkfasthet på 493 MPa, flytespenning på 340 MPa og bruddforlengelse på 9 – 10 %. De høyeste spenningene som opptrer i lokket ved testing er i følge analyser gjort i NX 8 på 470 MPa og opptrer nederst i ribbene i midten av lokket.

Det støpte lokket tålte ved testing en belastning på 550 kN (155 kN mer enn det som kreves i NS-EN 124) før det utviklet en sprekk. Sprekken utviklet seg i lokkets skjørt ved overgangen til en av ribbene. Simuleres belastningen på 550 kN i NX får lokket spenninger på 650 MPa nederst i ribber i midten. I området der sprekken utviklet seg er spenningene på 410 MPa. Det ble gjort en rekke simuleringer av støping ved håndforming i et forsøk på å forstå hvorfor lokket tålte mer enn forventet og hvorfor sprekken utviklet seg der den gjorde. Det er relativt stor forskjell mellom forholdene rundt ymping av smelte ved prøvestøp og støp på automatisk linje. I simuleringer av støp med ymping i stråle ved helling fra kupe ned i støpeform, som ved støping på automatisk linje, utvikler lokket en mikrostruktur stort sett bestående av ferritt. I simuleringer der det ympes i bunn av kupen eller i strålen ved helling mellom stor og liten kupe, som ved prøvestøpingen, vil mikrostrukturen få en veldig mye høyere andel perlitt. Følger av dette er blant annet høyere strekkfasthet og lavere duktilitet. Dette antas å være årsaken til at støpte lokk tålte høyere belastninger enn forventet. Støp ved håndforming simulert i MAGMA5 resulterer i strekkfasthet på 650 MPa i ribbene i lokkets midt, og 750 MPa i skjørtet der sprekken utviklet seg. At sprekken allikevel utviklet seg i lokkets skjørt begrunnes med at det var nokså høye konsentrasjoner av karbidet sementitt der. Sementittens sprøhet, kombinert med en spenningskonsentrasjon grunnet en kjerv eller annen uregelmessighet i overflaten, førte til utvikling av en sprekk.

Mikrostrukturen til jernet i det ferdig støpte produktet har det blitt brukt mye resurser på å studere. Andeler grafitt (grafittnodultetthet), ferritt, perlitt og sementitt i det støpte godset er avgjørende for dets egenskaper, og det har blitt gjort en rekke simuleringer for å se på hvordan disse kan påvirkes. Tidspunkt og metode for ymping har blitt studert og ympingens påvirkning på hvordan mikrostrukturen i jernet utvikler seg har vært sentral. Forskjeller i forhold rundt ymping av smelte gir store utslag i simuleringer i MAGMA5, og antas å være en stor del av årsaken til at de støpte lokkene tålte mer enn forventet. Sammenligning av simuleringer der støpet slås ut av sanda

ved forskjellige tidspunkter har tydelig vist hvordan høy avkjølingshastighet i temperaturområdet rundt 727 °C fører til en mer perlittisk mikrostruktur.

Det har også blitt brukt mye resurser på å studere i hvilken grad porøsitet i støpt gods og hastigheter ved fylling av form påvirker det endelige resultatet. Lokkets mekaniske egenskaper påvirkes i liten grad. Det er både i NSTVL og nytt design i følge MAGMA5 noe porøsitet. Den kommer av at støpet ikke mates etter innløpene har størknet og befinner seg i midten av lokkene nær overflaten på oversiden og i ribbenes øvre deler der spenningene er lave. Hastigheten til smelten ved fylling av støpeform er uproblematisk. Den vil ikke føre til noe erosjon av sand inne i formen, og er lav nok til at eventuelt slagg eller partikler ikke blir innesluttet i det støpte godset. MAGMA5 rapporterer om høye hastigheter i noen av innløpene ved simulering av støping av både nytt design og NSTVL. Det samme løpsystemet er tatt i bruk i begge tilfeller, og NSTVL har blitt masseprodusert lenge uten feil knyttet til erosjon av sand i innløp. De høye hastighetene i innløpene betraktes derfor som neglisjerbare.

Det nye designet viste seg å ha noen støpetekniske utfordringer. Dette var på grunn av det avstivende krysset i midten, og «sandsøylene» man må forme for å få støpt dem. Søylene er høye og knekker lett.

5.1 Videre arbeid

Som nevnt innledningsvis ble arbeid med lokkets låsemekanisme begrenset. Videre arbeid med videreutvikling av denne antas å kunne redusere lokkets vekt ytterligere. Arbeid med lokkets totale støpevekt og utviklingen av nytt løpsystem ble også begrenset. Også her antas det at det ved videre arbeid vil være mulig å redusere lokkets vekt.

I hvilken grad metode og tidspunkt for ymping påvirker det endelige produktets mekaniske egenskaper kan det være interessant å jobbe videre med. Forskjellen mellom ymping i strålen ved fylling av form og i bunn av kupe er stor ved simuleringer i MAGMA5 og vil være avgjørende for det støpte godsets mikrostruktur. Studie av mikrostruktur i støpte lokk stemmer overens med simuleringene. Det vil være interessant å sammenligne et nytt prøvestøp av det nye designet der smelten blir ympet i strålen ved fylling av støpeform, og testing av dette, med resultatene i denne rapporten.

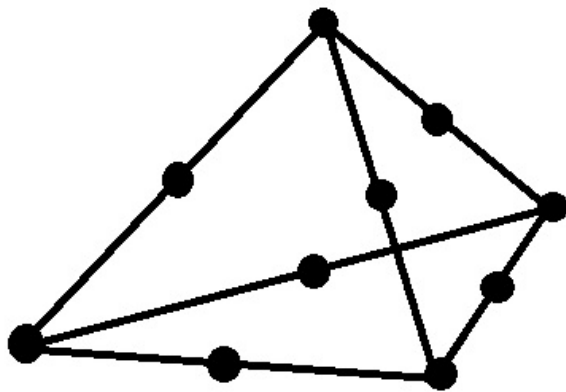
Som nevnt over finnes det støpetekniske utfordringer i det nye designet. Det kan gjøres videre arbeid med hensyn til disse. Ribbene i midten av avstiveren kan kanskje gjøres gradvis lavere innover mot midten av lokket. Lokkets bæreevne vil reduseres, men det er usikkert om det reduseres for mye eller ikke. Kanskje kan endringen av ribbene kombineres med raskere kjøling av dette området og en høyere andel perlitt i mikrostrukturen. Dette vil gjøre sandformen mer robust, og lokket lettere.

6 Referanser

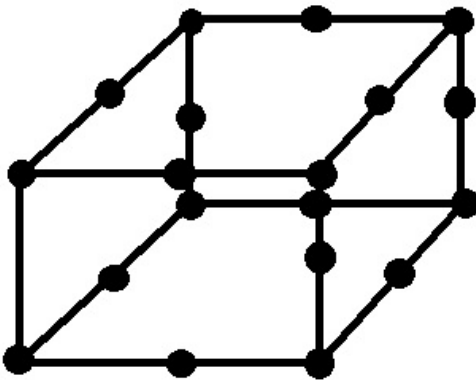
1. UJV. Historien om Ulefos Jernværk: Ulefos Jernværk; 2013. Available from: <http://www.ulefosnv.no/About%20us/Historien.aspx>.
2. Standard E. Sluktopper og kumtopper for kjøre- og fotgjengerområder
Konstruksjonskrav, typeprøving, merking og kvalitetskontroll. Standard Norge; 1997.
3. Standard E. Gjutna material - Segjärn. Swedish Standards Insititute; 2012.
4. Langøy M. Kompendium i støperiteknikk basert på Victor de Lange Davies. 1 ed. Trondheim: NTNU; 2010.
5. Wighus GI. E-mail korrespondanse. In: Breien WT, editor. 2014.
6. Irgens F. Fasthetslære. 5 ed. Trondheim: Tapir Forlag; 1996.
7. Irgens F. Statikk. 5 ed. Trondheim: Tapir Forlag; 1994.
8. Irgens F. Statikk og Fasthetslære. 2 ed. Trondheim: Tapir Forlag; 1981.
9. Waløen ÅØ. Dimensjonering ved hjelp av elementmetoden. 1 ed. Trondheim: NTH; 1995.
10. Zienkiewicz OC, Taylor RL. The finite element method. 5th ed. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann; 2000.
11. Olsen A. Støpejern. Tønsberg: Høgskolen i Vestfold; 2005.
12. Light optical micrograph of polished and etched ductile iron from lawnmower camshaft. Etched in 3 % Nital. 100X [Bilde]. McGill University: McGill University; 2009. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ductile_Iron.png.
13. Durand-Charre M. The microstructure of steels and cast irons. Berlin ; New York: Springer; 2004. xii, 404 p. p.
14. Boyer HE, Gall TL, American Society for Metals. Metals handbook. Desk ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals; 1984.
15. Warda R. Ductile iron data for design engineers Strongsville, Ohio, USA: Ductile iron society; 2013. Available from: [http://www.ductile.org/didata/Section3/3part2.htm#Manganese Copper Nickel Phosphorus](http://www.ductile.org/didata/Section3/3part2.htm#Manganese%20Copper%20Nickel%20Phosphorus).
16. Valberg HS. Applied metal forming : including FEM analysis. New York: Cambridge University Press; 2010. viii, 465 p. p.
17. Vince Adams AA. Building Better Products with Finite Element Analysis. 1 ed. Santa Fe, USA: OnWord Press; 1999.
18. Magmasoft. MAGMA5 Help. Magmasoft; 2013.
19. Breien WT. Nytt design for fremtidens kumlokk. Trondheim: NTNU, 2013.
20. Ebalta. Ebaboard 60-1. Technical datasheet. Derbyshire, UK: Ebalta; 2009.

21. UJV. Pakning UFPNS Ulefoss: UJV; 2014. Available from: <http://ulefos.com/product/pakning-ufpns/>.

A. Elementer



TETRA10



HEKSA20

Figur A1: Tetra10 - og Heksa20 elementer

Tetra10 elementer har 10 noder per element; en i hvert hjørne, og en midt på linjen som skiller elementets flater. I bruk får man på grunn av de 20 nodene flere knutepunkter. Et økt antall knutepunkter vil kunne gi bedre resultater ved analyser av enkle geometrier. Er geometrien mer komplisert er det bedre å bruke tetra10 elementer og la programvaren generere et mesh som i større grad er tilpasset geometrien.

B. Dynamisk belastning

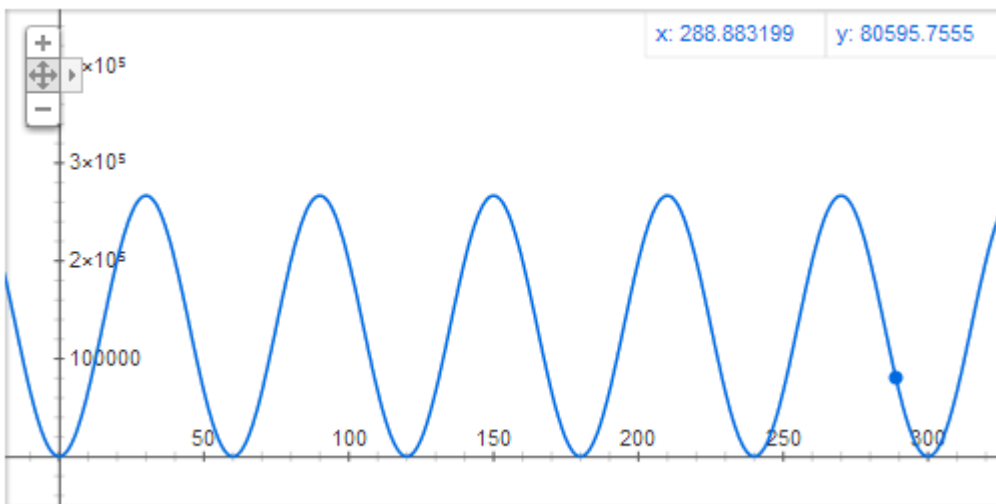
NS-EN 124 beskriver hvordan lokket skal belastes med 2/3 av prøvelasten fem ganger. Pålastningshastigheten skal være mellom 1 og 5 kN/s. Denne lasten ble representert i eget «subcase», eller underdeling i den statisk ikkelineære analysen.

I dialogboksen for belastning av typen kraft ble «field» valgt i nedtrekksmenyen. Deretter ble et felt definert på forhånd plukket fra listen. Kraftas angrepsflater ble definert som på figur 17. Feltet var et «force vs. time» - felt med følgende funksjon:

$$\left(\frac{266667}{2}\right) + \left(\frac{266667}{2}\right) \sin((\text{ug}_{\text{var}(\text{time})} - 15\text{sec}) * 6) \quad (21)$$

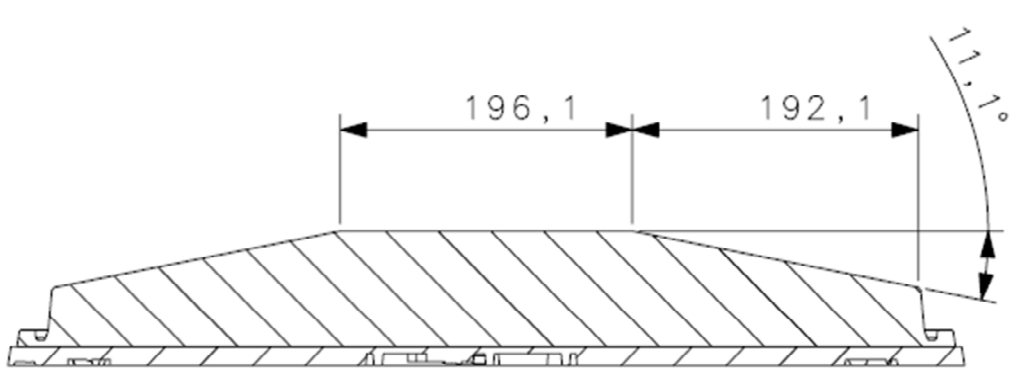
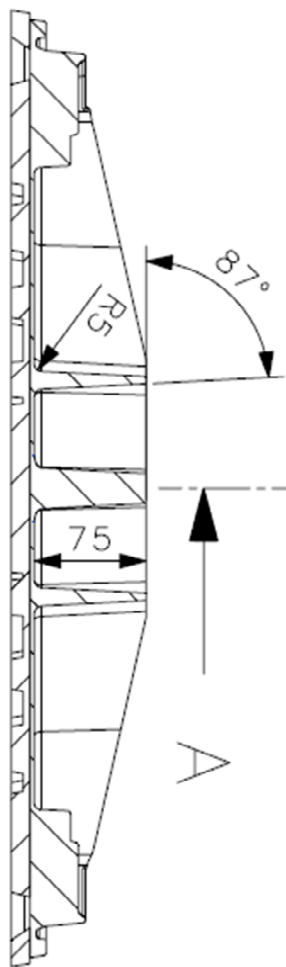
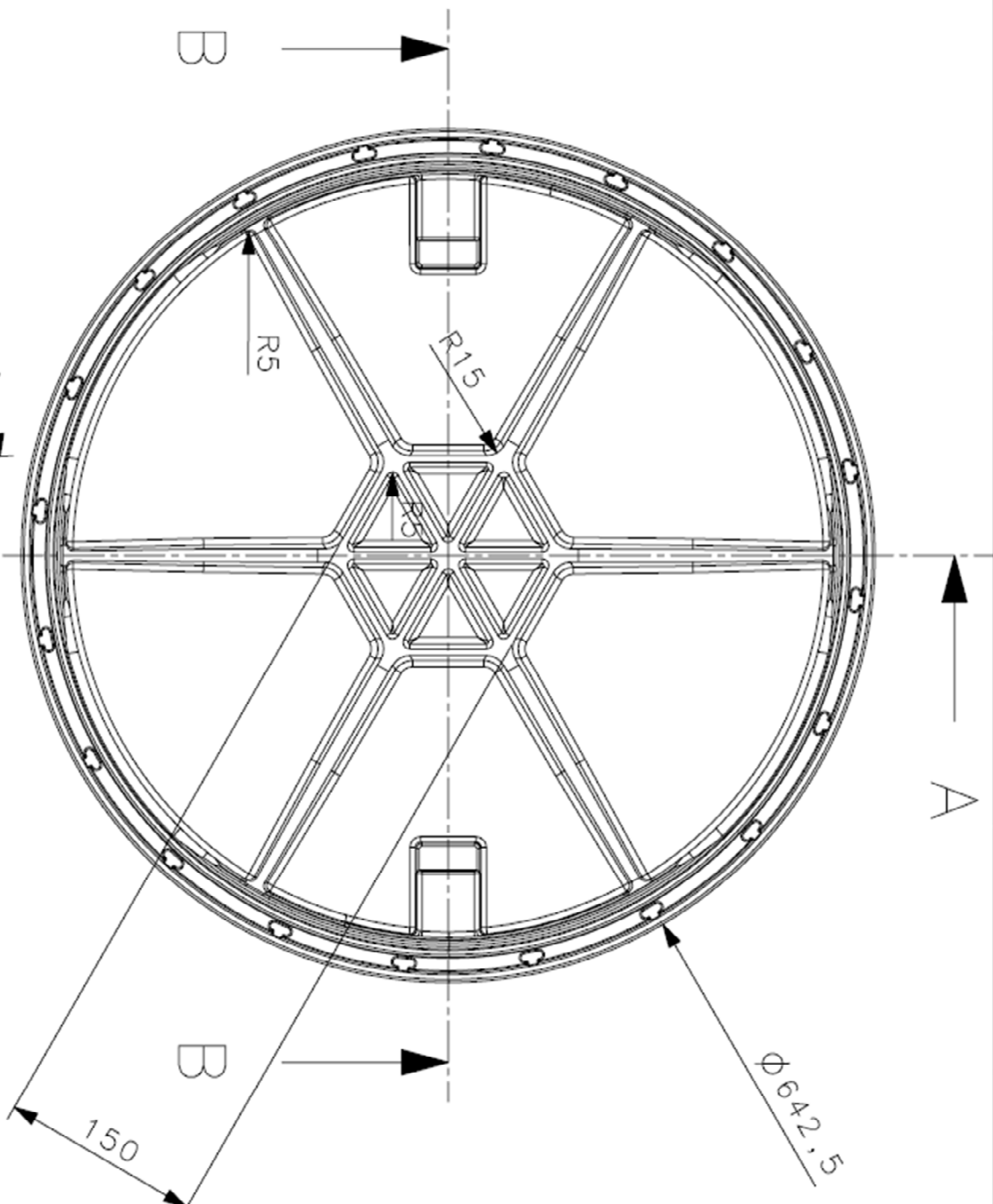
Variabelen «time» går fra 0 til 270 sek. NX opererer med perioder på 360 i stedet for 2π . Den vanlige måten å skrive funksjonen på er:

$$\left(\frac{266667}{2}\right) + \left(\frac{266667}{2}\right) \sin((x - 15)\left(\frac{2\pi}{60}\right)) \quad (22)$$



Figur B1: Funksjonen $y = (266667/2) + (266667/2)\sin((x-15)(2\pi/60))$

C. Målsatte tegninger



Kunnskap for en bedre verden

Tegnet av

WTB

Dato

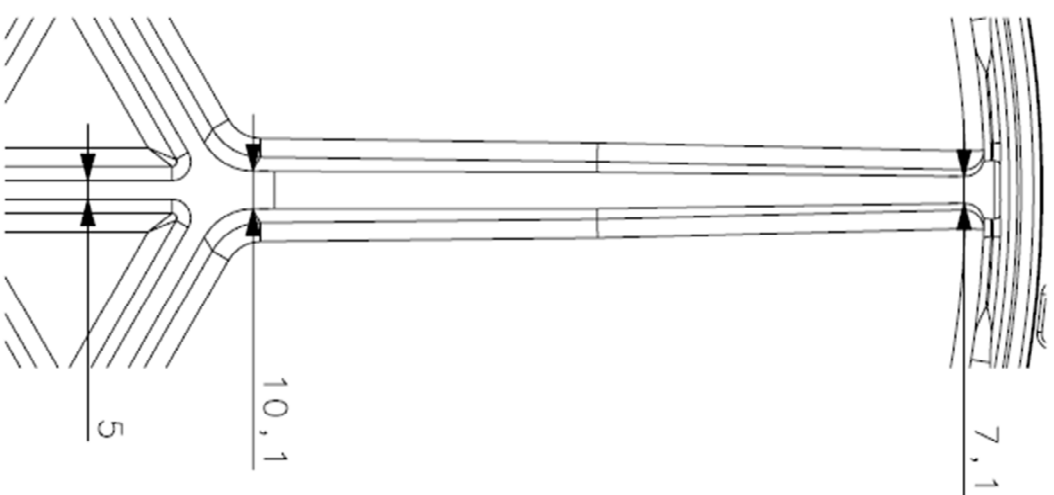
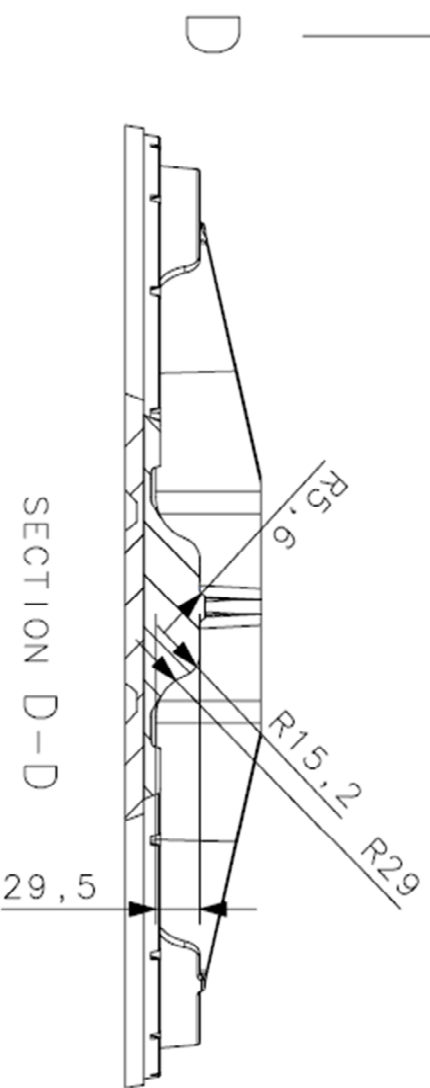
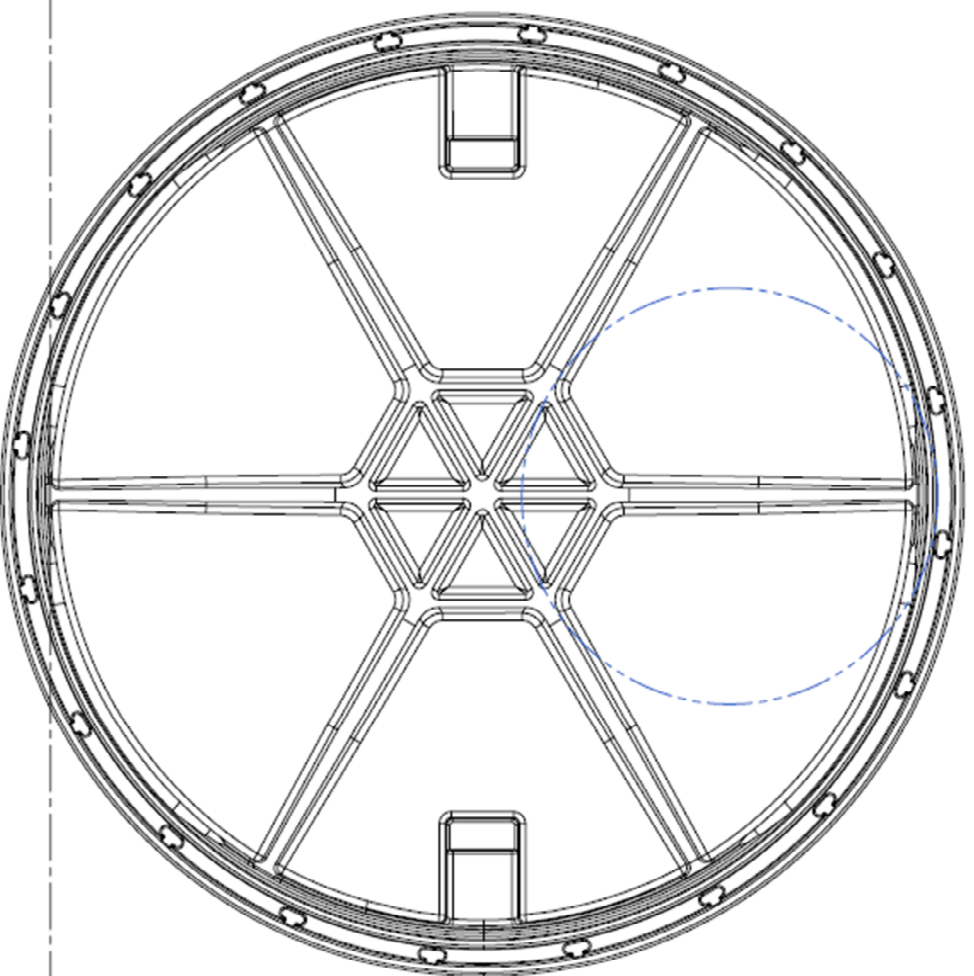
5.6.2014

Skala

1:5

SECTION B-B

SECTION A-A

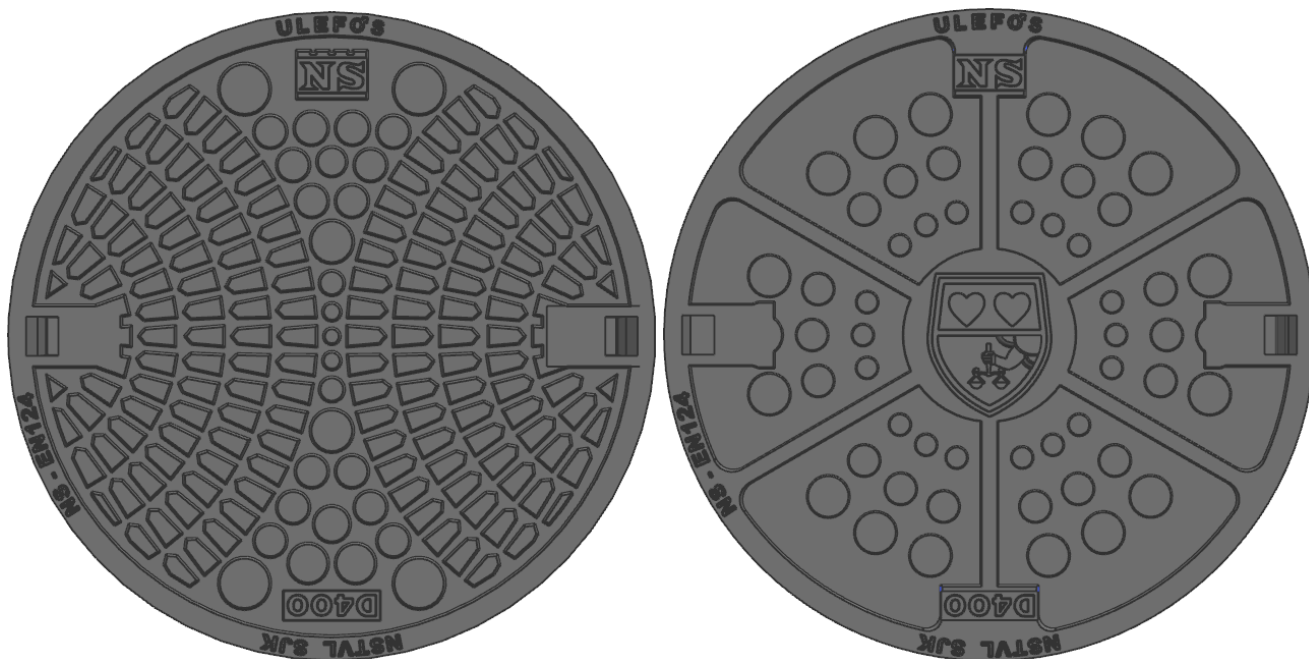


DETAIL E
SCALE 1:2



Tegnet av	WTB
Dato	5.6.2014
Skala	1:5

D. Lokkets overside



Endringene i lokkets overflatemønster er estetiske og påvirker i liten eller ingen grad lokkets bæreevne. De er i henhold til NS-EN 124, kap 7.12 (2). Slippvinkel i mønsteret er på 15°.

E. Risikovurdering

NTNU	Kartlegging av risikofylt aktivitet			Utarbeidet av	Nummer	Date
HMS				HMS-avd	HMSRV/2601	22.03.2011
				Godkjent av		Erstatler
				Rektor		01.12.2006

Enhet: *IPH*

Linjeleder: *Torstein Wøl*

Deftakere ved kartleggingen (mv funksjon):
William Topper Breien (student), Morten Langøy (veileder)

Kort beskrivelse av hovedaktivitet/hovedprosess:

Masteroppgave, student: William Topper Breien, Tittel på oppgaven: Design av fremtiden kumlokk

Er oppgaven rent teoretisk? (JA/NEI): NEI

Signaturer: Ansvarlig veileder: *[Signature]*

Student: *William T. Breien*

Dato: *5/3-14*

ID nr.	Aktivitet/prosess	Ansvarlig	Eksisterende dokumentasjon	Eksisterende sikringstiltak	Lov, forskrift o.l.	Kommentar
1	Utarbeiding av modell	Morten Langøy	HMS-plan for instituttet	Følge anvisninger og bruke påbudt verneutstyr		
2	Støpeforsøk	Morten Langøy	HMS-plan for støpen	Følge anvisninger og bruke påbudt verneutstyr		
3	Belastningsstesting	Morten Langøy	HMS-plan for støper/lab	Følge anvisninger og bruke påbudt verneutstyr		

NTNU		Utbekleidt av	Nummer	Dato
		HMS-end	HMSRV2871	22.03.2011
HMS		Godkjent av		Erstatet
		Rektor		01.12.2008

Risikovurdering

Enhet: **IPM**

Dato: *3/2-11*

Linjeleder: **Torgeir Welo**

Deltakere ved kartleggingen (m/ funksjon):

William Topper Breien (student), Morten Langøy (veileder)

Risikovurderingen gjelder hovedaktivitet:

Masteroppgave, student: William Topper Breien. Tittel på oppgaven: Design av fremtiden kumlokk

Signaturer: Ansvarlig veileder:

Student: *William T. Breien*

ID nr	Aktivitet fra kartleggings-skjemaet	Mulig uønsket hendelse/ belastning	Vurdering av sannsynlighet (1-5)	Vurdering av konsekvens:				Risiko-Verdi (menneske)	Kommentarer/status Forslag til tiltak
				Menneske (A-E)	Ytre miljø (A-E)	Øk/ materiell (A-E)	Om-damme (A-E)		
1	Utarbeiding av modell	Personskade Skade på utstyr	1	B A	A A	A A	B A	1B 1A	Aktivitet i prototypelab gjøres under veiledning / godkjenning av romansvarlig.
2	Støpeforsøk	Personskade Skade på utstyr Søl / utslipp	1	C A A	A A B	A B A	B A A	1C 1B 1B	All aktivitet gjøres med tilstedeværelse av instruert personall ved støperiet.
3	Belastningstesting	Personskade Skade på utstyr	1	C A A	A A B	A B A	B A A	1C 1B 1B	All aktivitet gjøres med tilstedeværelse av instruert personall ved støperiet/lab.

NTNU		Utdelt av		Nummer		Dato	
		HMS-end		HMSRV2601		22.03.2011	
HMS		Godkjent av				Erfatter	
		Riktige				01.12.2009	
Risikovurdering							

Sannsynlighet vurderes etter følgende kriterier:

Svært liten 1	Liten 2	Middels 3	Stor 4	Svært stor 5
1 gang pr 50 år eller sjeldnere	1 gang pr. 10 år eller sjeldnere	1 gang pr år eller sjeldnere	1 gang pr måned eller sjeldnere	Skjer ukentlig

Konsekvens vurderes etter følgende kriterier:

Gradering	Menneske	Ytre miljø Vann, jord og luft	Økologisk	Omdømme
E Svært Alvorlig	Død	Svært langvarig og ikke reversibel skade	Drifts- eller aktivitetsstans > 1 år.	Troverdighet og respekt betydelig og varig svekket
D Alvorlig	Alvorlig personskade. Mulig uførhet.	Langvarig skade. Lang restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans i opp til 1 år	Troverdighet og respekt betydelig svekket
C Moderat	Alvorlig personskade.	Mindre skade og lang restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans < 1 mnd	Troverdighet og respekt svekket
B Liten	Skade som krever medisinsk behandling	Mindre skade og kort restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans < 1uke	Negativ påvirkning på troverdighet og respekt
A Svært liten	Skade som krever førstehjelp	Ubetydelig skade og kort restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans < 1dag	Liten påvirkning på troverdighet og respekt

Risikoverdi = Sannsynlighet x Konsekvens

Beregn risikoverdi for Menneske. Enheten vurderer selv om de i tillegg vil beregne risikoverdi for Ytre miljø. Økonomimateriell og Omdømme. I så fall beregnes disse hver for seg.

Til kolonnen "Kommentarer/status, forslag til forebyggende og korrigerende tiltak":

Tiltak kan påvirke både sannsynlighet og konsekvens. Prioriter tiltak som kan forhindre at hendelsen inntreffer, dvs. sannsynlighetsreducerende tiltak foran skjerpet beredskap, dvs. konsekvensreducerende tiltak.

NTNU		Risikomatrixe		Uttarbeidd av		Nummer		Dato	
				HMS-ard		HMSRV2604		09.03.2010	
HMS/KS				godkjent av				Erstatler	
				Rektor				09.02.2010	
									

MATRISSE FOR RISIKOVURDERINGER ved NTNU

KONSEKVENNS					
Svært alvorlig	E1	E2	E3	E4	E5
Alvorlig	D1	D2	D3	D4	D5
Moderat	C1	C2	C3	C4	C5
Liten	B1	B2	B3	B4	B5
Svært liten	A1	A2	A3	A4	A5
	Svært liten	Liten	Middels	Stor	Svært stor
	SANNSYNLIGHET				

Prinsipp over akseptkriterium. Forklaring av fargene som er brukt i risikomatrixen.

Farge	Beskrivelse
Red	Uakseptabel risiko. Tiltak skal gjennomføres for å redusere risikoen.
Gul	Vurderingsområde. Tiltak skal vurderes.
Grønn	Akseptabel risiko. Tiltak kan vurderes ut fra andre hensyn.