

Kornform og mekaniske egenskaper for et granodiorittmateriale etter testknusing og laboratorieknusing

Nils Arne Fjeldstad Luke

Master i Bygg- og miljøteknikk
Innlevert: desember 2017
Hovedveileder: Helge Mork, IBM
Medveileder: Nils Uthus, Statens Vegvesen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Oppgavens tittel: Kornform og mekaniske egenskaper for et granodiorittmateriale etter testknusing og laboratorieknusing	Dato: 19.12.2017		
	Antall sider (inkl. bilag): 148		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Nils Arne Fjeldstad Luke			
Faglærer/veileder: Helge Mork			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Nils Uthus			

Ekstrakt:

Pukk er en ikke-fornybar ressurs som forbrukes i et høyt tempo. Av dette følger et ansvar om å forvalte tilgjengelige ressurser best mulig, også tilslagsmaterialer tiltenkt vegkonstruksjoner. Det er derfor nødvendig med kunnskap rundt de mekanismene som avgjør materialytelsen. Knusing er en avgjørende faktor for sluttproduktets kvalitet, og den generelle oppfatningen er at kubiske materialer bør tilstrebes ved produksjon av tilslagsmaterialer.

Oppgaven belyser temaer rundt kornformens påvirkning på mekaniske egenskaper for et knust (ett knusestrinn) granodiorittmateriale. Kornform evalueres gjennom testene flisighetsindeks og stenglighetsindeks, mens mekaniske egenskaper er målt etter Los Angeles og micro-Deval.

Det er ikke funnet en sammenheng mellom kornform og mekaniske egenskaper for det førstegangsknuste materialet. Testmaterialet er siden laboratorieknust med den hensikt å identifisere de konsekvensene dette medfører med tanke på kornform og styrkeegenskaper. Det er som følge av dette registrert drastisk forbedring hva angår både kornform (økt kubisitet) og motstand mot slitasje og knusing. Det er videre avveid hvorvidt den styrkemessige forbedringen kommer som følge av økt kubisitet eller om sprekker og mikroriss kan være fjernet i løpet av knusingen og at materialet med dette har gjenopprettet sine iboende styrkeegenskaper. Kausaliteten er i så måte ikke avgjort.

Oppgaven er skrevet i samarbeid med Statens vegvesen og er en del av forskningsprosjektet Kortreist stein. Testmaterialet er produsert i Nokia, Finland, og er knust ved Metso Minerals sitt testsenter i Tampere. Det er gjennomført tester på tre materialer som hver består av tre paralleller. Kornstørrelsefordelingen i forkant av testknusingen og matenivået skiller de tre materialene.

Stikkord:

1. Tilslagsmaterialer
2. Kornform
3. Mekaniske egenskaper
4. Knusing

Nils Luke

(sign.)

FORORD

Denne masteroppgaven, ført i pennen av Nils Arne Fjeldstad Luke, er utført høsten 2017 for Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU, og Statens vegvesen. Oppgaven er avsluttende del av sivilingeniørstudiet i Bygg- og miljøteknikk, med spesialisering innen veg, og har et omfang på 30 studiepoeng.

Denne oppgaven er muliggjort på grunn av hjelp fra personer i Statens vegvesen og NTNU.

Jeg ønsker derfor å rette en stor takk til hovedveileder og førsteamanuensis ved institutt for bygg- og miljøteknikk Helge Mork for veiledning og gode faglige diskusjoner det siste året. Videre ønsker jeg å takke medveileder Nils Uthus, Vegdirektoratet, for faglige innspill, utarbeidelse av tema for oppgaven og for å ha satt meg i kontakt med de rette personer innad i Vegvesenet.

Jeg har blitt tatt med «under vingene» til Marit Fladvad, doktorgradsstipendiat ved Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU, og hennes arbeid med NFR-prosjektet Kortreist stein. Som en konsekvens av dette har jeg hatt nærmest ubegrenset tilgang på pukkmaterialer og særdeles gunstige rammer for utarbeidelse av en masteroppgave. En stor takk til Marit Fladvad er derfor på sin plass.

Det laboratorierelaterte arbeidet er gjennomført ved Statens vegvesens Sentrallaboratorium i Trondheim, og mye tid er nedlagt her. Arnhild Ulvik har i så måte vært en særdeles viktig ressurs på grunn av hennes lange erfaring innen fagområdet og behjelpelige innstilling. Jeg ønsker i samme åndedrag å takke resten av medarbeiderne ved Sentrallaboratoriet for å ha blitt tatt godt imot i et meget inkluderende og kollegialt arbeidsmiljø.

Trondheim, desember 2017



Nils Arne Fjeldstad Luke

SAMMENDRAG

Pukk er en ikke-fornybar ressurs som konsumeres i et høyt tempo, hvilket har ført til knapphet flere steder i landet. Med dette følger det et ansvar om å forvalte tilgjengelige ressurser på en best mulig måte, også tilslagsmaterialer tiltenkt vegkonstruksjoner. Det er i Norge generelt god tilgang på steinmaterialer av høy kvalitet, hvilket muliggjør at store deler av trafikklasterne kan bli tatt opp av de ikke-bituminøse lagene i en vegkropp. For å sikre god ressursbruk av tilslagsmaterialer er det nødvendig med kunnskap rundt de mekanismene som avgjør materialytelsen. En faktor som er avgjørende for sluttproduktets kvalitet er knuseprosessen, og den generelle oppfatningen er at kubiske materialer i størst mulig grad bør tilstrebes.

Oppgaven belyser temaer rundt kornformens påvirkning på mekaniske egenskaper for et testknust (kun ett knusestrinn) granodiorittmateriale. Kornform er evaluert gjennom testene flisighetsindeks og stenglighetsindeks, mens mekaniske egenskaper er målt etter slitasjetesten micro-Deval og knuse -og slitasjetesten Los Angeles.

Det er ikke funnet en sammenheng mellom kornform og mekaniske egenskaper for dette førstegangsknuste materialet, hvilket kan komme av at de relative forskjellene mellom kornformen til materialene rundt testfraksjonen (10-14 mm) er funnet til å være liten. Det er registrert høye verdier for både flisighet og stenglighet, og dette forhindrer avdekkingen av en eventuell korrelasjon.

Det er funnet god korrelasjon mellom flisighetsindeks og stenglighetsindeks.

Materialet er siden produksjonsknust med den hensikt å identifisere de konsekvensene dette medfører med tanke på kornform og styrkeegenskaper. Optimal knusing er vektlagt, hvilket innebærer at størst andel materiale knuses ned til testfraksjonen 10-14 mm. Det er som følge av laboratorieknusingen observert drastisk forbedring i kornform (økt kubisitet), motstand mot slitasje og motstand mot knusing. Det er videre avveid hvorvidt den styrkemessige forbedringen kommer som følge av økt kubisitet eller om sprekker og mikroriss kan være fjernet i løpet av knusingen og at materialet med dette har gjenopprettet sine iboende styrkeegenskaper. Kausaliteten er i så måte ikke avgjort.

Det ble i etterkant av arbeidet funnet omfattende avvik ved stavsiktene som er benyttet til å finne flisighetsindeksen. Det er likevel valgt å presentere resultatene som fremkommer av denne testen.

Oppgaven er skrevet i samarbeid med Statens vegvesen og er en del av det langt mer omfattende Kortreist stein-prosjektet, hvor også Marit Fladvad er involvert via hennes doktorgradsstipendiat. Testmaterialet er produsert i Nokia, Finland, og videre knust ved Metso Minerals sitt testsenter i Tampere. Metso Minerals er en samarbeidspartner i prosjektet.

Det er gjennomført tester på tre materialer (T4, T5 og T8) som hver består av tre paralleller (A, B og C). Kornstørrelsesdistribusjonen i forkant av testknusingen og matenivået ved nevnte knusing skiller materialene.

ABSTRACT

Crushed rock is a non-renewable resource which is consumed rapidly. This has led to scarcity of crushed rock several places throughout Norway. Having this in mind, we have a responsibility to optimize the usage of available resources, including aggregates meant for road constructions. In Norway, the access to high quality rock materials are in general good, allowing the non-bituminous layers of the road to withstand a big share of the traffic loads. Because of this, knowledge about the mechanisms that determine the material performance are needed to ensure good usage of the scarce resources. A factor that is important to the end product of aggregates is the crushing process, and the general opinion is that cubical grain shape is preferable.

The master thesis tries to illuminate the effect grain shape have on the mechanical properties of a test crushed (one crushing step) granodiorite material. Grain shape is evaluated using flakiness index test and shape index test, while mechanical properties are measured by the abrasion test micro-Deval and the crushing (and abrasion) test Los Angeles.

No correlation regarding grain shape and mechanical properties are found for the test crushed material. A reason for this might be because of small differences in grain shape between the materials in the relevant grain size fractions (10-14 mm). The results obtained implies high flakiness and shape index for all materials, which prevents the uncovering of an eventual correlation.

Flakiness index and shape index are found to correlate well.

The materials are later crushed in laboratory to reveal any consequences regarding grain shape and mechanical properties. Optimal crushing is emphasized and achieved when most of the material are crushed into the test fraction of 10-14 mm, measured by weight. The results implies that, because of the laboratory crushing, both the cubicity and the mechanical properties have improved drastically. It is further contemplated whether the grain shape helps improving the resistance against wearing and crushing, or if removal of cracks when adding two extra crushing steps are the main reason.

After completion of the laboratory work, great deviations was found on the sieves used to obtain the flakiness index results. Nevertheless, it is chosen to include the flakiness index results, even though the results are not valid.

The report is written in cooperation with the Norwegian Public Roads Administration and is a part of the far more comprehensive "Kortreist stein"project, which is the link to Marit Fladvads doctoral thesis. The test material is produced in Nokia, Finland, and further crushed at Metso Minerals' test center in Tampere. Metso Minerals is partner in the project.

INNHALDSFORTEGNELSE

Forord.....	i
Sammendrag.....	iii
Abstract	v
Innholdsfortegnelse	1
Figurliste.....	ix
Tabelliste	xi
Kapittel 1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Avgrensninger ved oppgaven	2
1.4 Oppgavens oppbygning	2
Kapittel 2. Litteratursøk	5
2.1 Metoder for beskrivelse av kornform	5
2.1.1 Angularitet og overflatetekstur	6
2.1.2 Stenglighetsindeks/Formindeks	7
2.1.3 Flisighetsindeks	9
2.1.4 Andre metoder for beskrivelse av kornform.....	12
2.2 Metoder for beskrivelse av mekanisk styrke	15
2.2.1 Los Angeles	15
2.2.2 Micro-Deval	21
2.3 Sammenheng mellom kornform og mekaniske egenskaper	26
2.3.1 Kornform og treaksialtest	26
2.3.2 Kornform og slagbaserte tester	27
2.3.3 Kornform og Los Angeles-testen	30
2.3.4 Kornform og micro-Deval-testen	32
2.4 Knusingens innvirkning på kornform.....	34
2.4.1 Knusemetodens påvirkning på sluttproduktets kornform.....	35
2.4.2 Materialets påvirkning på knuseresultatet	37
2.5 Oppsummering av litteratursøk	38
Kapittel 3. Metode.....	39
3.1 Testplan	39
3.2 Avvik fra gjeldende standarder	40
3.2.1 Neddeling av prøver	40
3.2.2 Knusing	42

3.2.3	Flisighetsindeks	42
3.2.4	Stenglighetsindeks	48
3.2.5	Los Angeles	48
3.2.6	micro-Deval	48
3.3	Laboratorieknusing	48
3.4	Testet bergart	49
3.5	Forskjeller mellom materialene T4, T5 og T8	49
Kapittel 4.	Resultater	51
4.1	Sikteanalyser	51
4.2	Resultater knytta til kornform for førstegangsknust materiale	53
4.3	Kornform og styrkeegenskaper for førstegangsknust materiale	58
4.4	Effekt av laboratorieknusing	59
Kapittel 5.	Diskusjon	65
5.1	Antagelser	65
5.2	Kornform	65
5.2.1	Korrelasjon mellom flisighetsindeks og stenglighetsindeks	65
5.2.2	Avvik på stavsikter	67
5.2.3	Effekt av parametre ved førstegangsknusing	68
5.3	Kornform og styrkeegenskaper for førstegangsknust materiale	70
5.4	Effekt av laboratorieknusing	71
Kapittel 6.	Konklusjon	77
Kapittel 7.	Videre arbeid	79
Referanser	81
Vedlegg	85

FIGURLISTE

Figur 2.1 Kornform, angularitet og overflatetekstur fungerer på ulike nivåer. (Masad, 2007).....	5
Figur 2.2 Fire testmaterialer med ulik angularitet eller kornform. (Uthus, 2007).....	7
Figur 2.3 Et skyvelære som brukes til å måle største og minste dimensjon. (Statens vegvesen, 2016)..	8
Figur 2.4 Flisighetsindeks for ulike sorteringer og materialer. (Erichsen, 2013).....	10
Figur 2.5 Innvendige og utvendige sirkler basert på tverrsnittets største diameter. (Riley, 1941).....	13
Figur 2.6 Lees klassifiseringsdiagram for kornformer. (Janoo, 1998).....	14
Figur 2.7Hyllen bidrar til løfting av materialet og kulene. (Selmer-Olsen, 1980).....	16
Figur 2.8 LA-trommel med enkelte mål. (Statens vegvesen, 2016).....	17
Figur 2.9 Sammenheng mellom nedknusning i LA-testen og stor treaksialtest. (Nålsund, 2014).....	18
Figur 2.10 Prinsipielt oppsett av fullskala testmodell for jernbane. (Nålsund, 2014).....	19
Figur 2.11 Sammenheng mellom knust materiale ved fullskala testmodell og LA-test med vått ballastmateriale. (Nålsund, 2014).....	19
Figur 2.12 Kornkurver etter ulike mølletester. (Erichsen et al., 2011).....	20
Figur 2.13 Micro-Deval-apparatet som står på Sentrallaboratoriet i Trondheim.	22
Figur 2.14 Micro-Deval-verdier i ballastfraksjonen sett i sammenheng med stor treaksialtest og fullskala testmodell. (Nålsund, 2014).....	24
Figur 2.15 Permanent vertikal nedbøyning i stor treaksialtest og micro-Deval-verdier. (Nålsund, 2014).....	25
Figur 2.16 Micro-Deval-verdier i ballastfraksjonen sett i sammenheng med angularitet (venstre) og overflatetekstur (høyre). (Nålsund, 2014).....	25
Figur 2.17 Glatte, sfæriske partikler med liten variasjon i diameter. (Uthus, 2007).....	27
Figur 2.18 Fallprøveapparat. (Selmer-Olsen, 1980).....	28
Figur 2.19 Sammenheng mellom flisighet og sprøhet for grovkornige og finkornige bergarter. (Selmer-Olsen, 1980).....	29
Figur 2.20 Korrelasjon mellom LA og sprøhetstallet for ulike verdier av flisighetstallet. (Selmer-Olsen, 1980).....	29
Figur 2.21 Sammenheng mellom LA-verdier og flisighet for ulike testfraksjoner. (Erichsen et al., 2010).....	31
Figur 2.22 Flisighetstallets påvirkning på LA-verdien og sprøhetstallet for sandstein. (Erichsen, 2013).....	32
Figur 2.23 Sammenheng mellom micro-Deval-verdier og flisighet for ulike testfraksjoner. (Erichsen et al., 2010).....	33
Figur 2.24 Sammenheng mellom micro-Deval-verdier og flisighetsindeks for tre materialer. (Rigopoulos et al., 2013).....	34
Figur 2.25 Kjefteknuseren ved Sentrallaboratoriet som er benyttet i arbeidet med oppgaven.....	35
Figur 2.26 Sprøhetstallet for prøver med ulik prøvemengde i laboratrieknusingen. (Ulvik, 1994)....	36
Figur 3.1 "Storsplitteren" ved Sentrallaboratoriet.	41
Figur 3.2 Spalteåpning ved splitting av 0-90 mm-materialene.	41
Figur 3.3 Avvik for stavsikter på 2,5 mm, 3,15 mm, 4,0 mm og 5,0 mm. Utarbeidet ved Sentrallaboratoriet.	43
Figur 3.4 Avvik for stavsiktene på 6,3 mm, 8 mm, 10 mm og 12,5 mm. Utarbeidet ved Sentrallaboratoriet.	44
Figur 3.5 Avvik for stavsiktene på 16 mm, 20 mm, 25 mm og 31,5 mm. Utarbeidet ved Sentrallaboratoriet.	45
Figur 3.6 Avvik for stavsiktene på 40 mm og 50 mm. Utarbeidet ved Sentrallaboratoriet.....	46
Figur 3.7 3,15 mm-stavsikt med store visuelle avvik.....	47
Figur 4.1Kornfordeling for T4.	51

Figur 4.2 Kornfordeling for T5.	52
Figur 4.3 Kornfordeling for T8.	52
Figur 4.4 Korrelasjon mellom endelig FI og SI (4-100 mm).	53
Figur 4.5 FI og SI for delfraksjonene til T8B.....	54
Figur 4.6 FI og SI for delfraksjonene til T5B.....	54
Figur 4.7 FI for 10-16 mm-fraksjonene.....	55
Figur 4.8 SI for 8-16 mm-fraksjonene.....	56
Figur 4.9 Gjennomsnittlig FI for materialene T4, T5 og T8 (10-16 mm).	56
Figur 4.10 Gjennomsnittlig SI for materialene T4, T5 og T8 (8-16 mm).	57
Figur 4.11 LA-verdier og SI (8-16 mm).....	58
Figur 4.12 Micro-Deval-verdier og SI (8-16 mm).	59
Figur 4.13 FI (10-16 mm) for førstegangs- og lab.knust materiale.	60
Figur 4.14 SI for førstegangsknust (8-16 mm) og lab.knust (10-16 mm) materiale.	60
Figur 4.15 LA-verdier og FI (10-16 mm) for førstegangs- og lab.knust materiale.	61
Figur 4.16 LA-verdier og SI for førstegangsknust (8-16 mm) og lab.knust (10-16 mm) materiale.....	61
Figur 4.17 LA10-verdier for førstegangs- og lab.knust materiale.....	62
Figur 4.18 Micro-Deval-verdier og FI (10-16 mm) for førstegangs- og lab.knust materiale.....	62
Figur 4.19 Micro-Deval-verdier og SI for førstegangsknust (8-16 mm) og lab.knust (10-16 mm) materiale.	63
Figur 5.1 Stenglige korn som følge av stor lengste dimensjon eller liten minste dimensjon.	66
Figur 5.2 Prosentandel masse ved delfraksjonene.....	68
Figur 5.3 Sammenligning av flisighetsindeksene for T4, T5 og T8.	69
Figur 5.4 Sammenligning av stenglighetsindeksene for T4, T5 og T8.	69
Figur 5.5 Finstoffproduksjon som følge av en sikteoperasjon med stavsikt.	73
Figur 5.6 Sammenligning av kornkurver for T8-materialet, også etter lab.knusing.	74
Figur 5.7 Gjennomsnittlige LA-verdier for laboratorieknust materiale.	75
Figur 5.8 Gjennomsnittlige micro-Deval-verdier for laboratorieknust materiale.	75

TABELLISTE

Tabell 1 En oppsummering av terminologien rundt ulike nivåer av kornform. (Rodriguez et al., 2013)	5
Tabell 2 FI og SI for fire ulike materialer. Gjengitt etter Uthus et al. (2005).	8
Tabell 3 Fraksjoner med tilhørende spaltebredde for stavsikter. (Statens vegvesen, 2016).....	9
Tabell 4 Kornformsevaluerte materialer, samt kulemølleverdi og sprøhetstall. (Chytla et al., 1995)...	11
Tabell 5 Flisighet og stenglighet for syv materialer. (Chytla et al., 1995)	12
Tabell 6 Skriftlig beskrivelse av fire kornformklasser, inkludert oversettelse. Gjengitt etter Janoo (1998).	14
Tabell 7 Testplan.....	39
Tabell 8 Toleransegrenser for avstand mellom stavene i stavsikter. Kopiert fra ISO (2013)	42
Tabell 9 Knuseparametere for T4, T5 og T8.....	49
Tabell 10 Korrelasjon mellom delfraksjonenes FI og SI.....	55
Tabell 11 Standardavviket for gjennomsnittet av FI (10-16 mm og SI (8-16 mm).....	57
Tabell 12 T-tester mellom materialene T4, T5 og T8 for FI og SI.....	57
Tabell 13 T-tester mellom materialene T4, T5 og T8 mtp. LA- og micro-Deval-verdier.....	59
Tabell 14 T-tester av metodene for førstegangs- og lab.knust materiale.	63
Tabell 15 T-tester av metodene for førstegangs- og lab.knust materiale, med hensyn på variasjoner mellom materialene.	64
Tabell 16 Antall avvik ved toleransegrensene.....	67
Tabell 17 Oppsummering av testresultater etter førstegangs- og laboratorieknusing.	71
Tabell 18 Kategorier for maksimalverdier for LA-verdier. (Norsk Standard, 2009)	72
Tabell 19 Massetap som følge av ulike operasjoner.....	73

KAPITTEL 1. INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN

Steinmaterialer er det mest brukte materialet i vegkonstruksjoner. I 2014 ble det produsert 79 millioner tonn sand, grus og pukk i Norge, og pukk er av disse desidert mest produsert med 65 millioner tonn. Dette er ikke-fornybare ressurser som forbrukes i et høyt tempo, hvilket har medført knapphet flere steder i landet (Norges geologiske undersøkelse, 2017). Av dette følger et ansvar om å forvalte tilgjengelige ressurser på en best mulig måte, også materialer tiltenkt vegkonstruksjoner. Norge har god tilgang på steinmaterialer av høy kvalitet, hvilket muliggjør at store deler av trafikklastene kan bli tatt opp i de ubundne lagene (Hoff, 2008).

Ved produksjon av tilslagsmaterialer er knuseprosessen avgjørende for sluttproduktets kvalitet, og det later til å være en generell oppfatning om at kubiske materialer bør tilstrebes (Eloranta, 1995, Tutumluer, 2013). Det er tidligere funnet tydelig korrelasjon mellom fallprøven og steinmaterialets kornform (Selmer-Olsen, 1980, Heikkila, 1991). Denne korrelasjonen har imidlertid vist seg vanskeligere å påvise gjennom gjeldende tester for mekanisk styrke, slitasetesten micro-Deval og knusetesten Los Angeles. Erichsen et al. (2010) fant en viss sammenheng mellom flisighet og micro-Deval, mens LA har vist seg som lite ømfintlig for endringer i flisigheten (Erichsen et al., 2010, Selmer-Olsen, 1980). Benediktsson and Wigum (2015) fant at restmassen på nederste sikt i testfraksjonen i større grad viser sammenhengen mellom flisighet og både micro-Deval og LA. Materialenes flisighet ble i nevnte forsøk variert fra 0 til 100, hvilket er ekstremverdier som ikke evalueres i denne oppgaven.

Opgaven tar sikte på å belyse hvorvidt kornformen, representert ved flisighetsindeks og stenglighetsindeks, påvirker de mekaniske egenskapene i form av testene micro-Deval og Los Angeles. Sammenhengen mellom stenglighetsindeks og mekaniske egenskaper er ikke tidligere blitt forsøkt funnet.

Også laboratorieknusinges effekt på steinmaterialer er vurdert i oppgaven. Vanlig praksis i Norge ved evaluering av styrken til ubundne materialer i vegkonstruksjoner, er å hente ut en viss mengde prøvemateriale fra vegkroppen for siden å frakte dette inn til testområdet. Testmaterialet består gjerne av større partikler som knuses ned i laboratorium og videre testes i standardfraksjonen 10-14 mm. Det er vurdert hvorvidt en slik nedknusing vil endre materialenes mekaniske egenskaper og dermed gi et mindre representativt bilde av de materialene som vegkonstruksjonen faktisk består av.

Kun én forekomst er benyttet i oppgaven, hvilket kan sies å være en svakhet ved arbeidet. Resultatene er i bunn og grunn kun gjeldende for Nokiabergarten som er testet, men det er likevel liten grunn til å tro at andre bergarter vil gi ulik materialoppførsel -selv om bergarter har ulike styrkekarakteristikker som videre vil påvirke resultatene.

Opgaven er skrevet i samarbeid med Statens vegvesen og er en del av det langt mer omfattende Kortreist stein-prosjektet, hvor også Marit Fladvad er involvert i forbindelse med hennes doktorgradsstipendiat. Materialet som er testet kommer fra Nokia i Finland og er knust ved Metso Minerals sitt testsenter i Tampere. Metso Minerals er en samarbeidspartner i prosjektet.

Tre materialer á tre paralleller er testet i forbindelse med oppgaven, og det er forskjeller i matenivået og kornstørreledistribusjonen i forkant av knusingen som skiller de tre materialene. Materialenes opprinnelige navn, T4, T5 og T8, er beholdt nettopp for at oppgaven kan settes i en større sammenheng ved senere anledninger. Videre betegnes de tre parallellene ved A, B eller C etter materialnavnet.

1.2 PROBLEMSTILLING

Oppgaven ønsker å belyse hvorvidt det er sammenheng mellom kornform og mekaniske egenskaper for Nokiamaterialet. Kornformen evalueres etter de standardiserte testmetodene formindeks/stenglighetsindeks (Norsk Standard, 2008) (sistnevnte er betegnelse er benyttet i oppgaven) og flisighetsindeks (Norsk Standard, 2012). Styrkeegenskapene måles gjennom slitasetesten micro-Deval (Norsk Standard, 2011) og knuse (-og slitasje-) testen Los Angeles (Norsk Standard, 2010).

Ettersom det benyttes to kornformevalueringsmetoder er det interessant å finne hvorvidt disse korrelerer eller ikke.

Oppgaven skal også vurdere hvorvidt laboratoriekusing endrer materialets mekaniske egenskaper. Fremgangsmetoden for laboratoriekusing er beskrevet i Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser og innebærer at håndstykketørrelser av pukknuses ned to ganger, først én og én stein, deretter fullmates knuseren (Statens vegvesen, 2016). Dette vil gi et materiale med annen kornform, samtidig som svake punkter og mikorriss i partiklene kan være fjernet. Disse effektene kan gi endringer i de mekaniske egenskapene, og kornformen må derfor evalueres på nytt for i større grad å ha mulighet til å skille disse to.

1.3 AVGRENSNINGER VED OPPGAVEN

Kun ett materiale er testet i oppgaven og resultatene gjelder i ytterste konsekvens kun for dette materialet. Det er likevel, som nevnt, liten grunn til å tro at de resultater som fremgår av oppgaven ikke kan gjelde også for andre materialer.

Kornform er en fundamental egenskap ved tilslagsmaterialer, men har likevel vist seg som vanskelig å karakterisere og kvantifisere selv for de enklere formene. Mange metoder har blitt utviklet de siste 100 årene, og til tross for omfattende litteratur på emnet er det ikke kommet til enighet om en felles terminologi for hvordan kornformen best kan beskrives. Kun to metoder for evaluering av materialenes kornform er benyttet i oppgaven, -som attpåtil korrelerer med hverandre.

Det er i etterkant av det laboratorierelaterte arbeidet funnet at stavsiktene som er benyttet til å finne flisighetsindeksen avviker langt mer enn toleransegrensene tillater (ISO, 2013). Resultatene fra denne testen er inkludert i oppgaven, men er ikke gyldige som følge av disse avvikene. Dette forklares ytterligere i Kapittel 3 Metode.

Angularitet og mikrotekstur vurderes ikke. Det antas at ettersom samme bergart er benyttet, og det eneste som skiller de tre materialene er parametre ved knuseprosessen, så er angulariteten og mikroteksturen den samme for materialene.

1.4 OPPGAVENS OPPBYGNING

Oppgaven er i stor grad bygget opp etter IMRoD-modellen (NTNU). Litteratursøket er imidlertid presentert som et selvstendig kapittel i Kapittel 2.

Metoden presenteres i Kapittel 3 i form av en testplan med tilhørende forklaring, samt avvik fra gjeldende standarder og en gjennomgang av forskjellene mellom de tre materialene.

Videre følger resultater i Kapittel 4 og diskusjon i Kapittel 5. Konklusjon og anbefalinger til videre arbeid presenteres i egne kapitler i henholdsvis Kapittel 6 og Kapittel 7.

Oppgavebeskrivelsen ligger vedlagt i Vedlegg A.

KAPITTEL 2. LITTERATURSØK

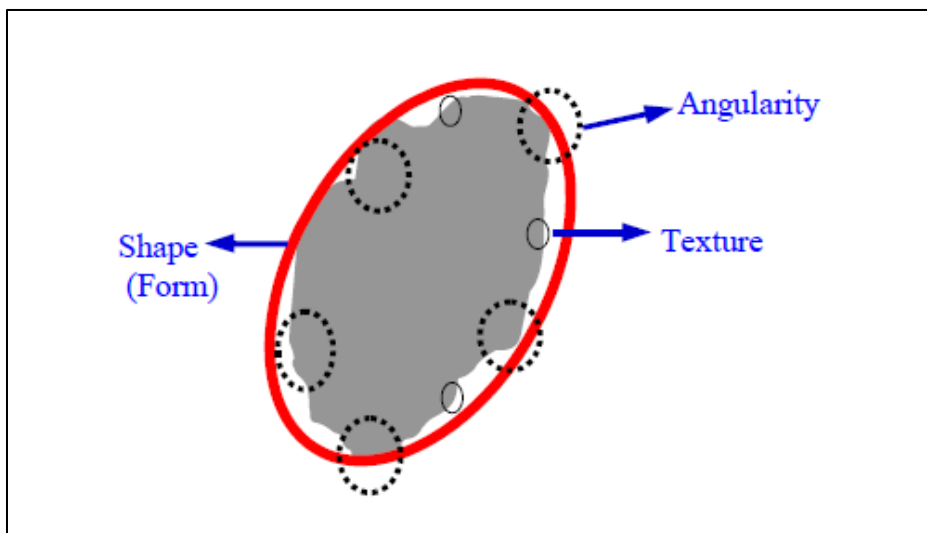
Litteratursøket er ment som en oppsummering av relevant litteratur som finnes om temaene som behandles i oppgaven. Det er lagt særskilt vekt på testmetodene som er benyttet i eget arbeid, Los Angeles, micro-Deval, flisighetsindeks og stenglighetsindeks, samt sammenhenger mellom mekanisk styrke og kornform. Også effekten av knusing er belyst.

2.1 METODER FOR BESKRIVELSE AV KORNFOM

Ved karakterisering av steinpartiklers geometri skilles det normalt mellom tre egenskaper:

1. Kornform
2. Angularitet
3. Overflatetekstur

Figur 2.1 illustrerer forskjellene mellom disse egenskapene.



Figur 2.1 Kornform, angularitet og overflatetekstur fungerer på ulike nivåer. (Masad, 2007)

Egenskapene fungerer på ulike nivåer av partiklene, der kornformen reflekterer variasjonene i proporsjonene (Masad, 2007). Partikler kan tendere mot å være kubisk-, disk-, blad- eller stavformede (Barksdale and Itani, 1989). Med angulariteten menes variasjonene i hjørnene og størrelsene på vinklene til hjørnene. Kantethet kan også brukes om angulariteten, og jo mer kantete en partikkel er, desto mer angulær er den. Overflateteksturen beskriver irregularitetene på partiklens overflate i en skala som er for liten til at den dekkes av kornformen eller angulariteten (Masad, 2007).

Rodriguez et al. (2013) beskriver disse tre nivåene som å betrakte partiklene gjennom stor, mellomstor eller liten skala. Tabell 1 oppsummerer termene som brukes til å beskrive kornformen til partikler ved de ulike skalaene, sammen med de respektive antonymene.

Tabell 1 En oppsummering av terminologien rundt ulike nivåer av kornform. (Rodriguez et al., 2013)

Skala	Størrelse	Antonym
Stor skala	Sfærisitet	Utstrakthet
Mellomstor skala	Rundhet	Angularitet

Liten skala	Røffhet/ruhet	Glatthet
-------------	---------------	----------

Ettersom egenskapene fungerer på ulike skalaer innenfor hver partikkelstørrelse, kan de skilles fra hverandre og de kan variere mye uten at de to resterende egenskapene nødvendigvis påvirkes (Masad, 2007).

Stor skala vil videre i oppgaven betegnes ved kornform, mens angulariteten og overflateteksturen vil være ensbetydende med henholdsvis mellomstor og liten skala.

2.1.1 ANGULARITET OG OVERFLATETEKSTUR

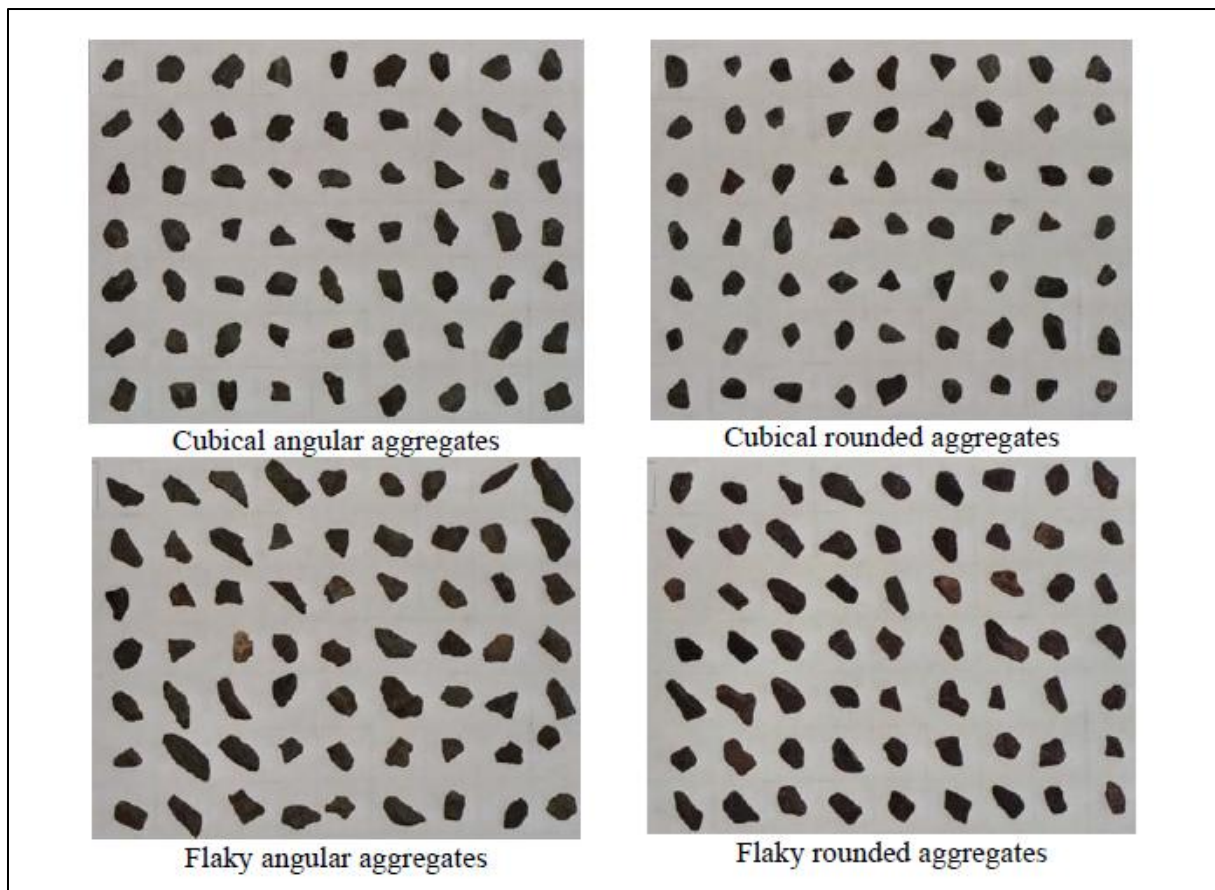
Til vegbyggingformål er det ønskelig med noe angulære partikler fremfor avrundede når det kommer til de ubundne lagene. Angulariteten avgjør den interne skjærmotstanden som materialet kan gi. Et knust og avrundet materiale tenderer mot å «rulle» bort ved påføring av trafikklaster. Dette gir da et materiale med lav motstand mot spordannelser (Tutumluer, 2013).

Empirien tilsier at økt angularitet og overflaterøffhet gir økt resilientmodul samtidig som tverrkontraksjonstallet synker (Barksdale and Itani, 1989, Thom, 1988, Uthus, 2007). Dette innebærer at uknuste eller delvis knuste steinmaterialer har lavere stivhet enn de mer angulære knuste materialene. Årsaken til dette tilskrives det at knuste (og mer angulære) materialer har et høyere antall kontaktpunkter, som igjen fordeler kreftene bedre og skaper mer friksjon mellom partiklene (Lekarp et al., 2000). Dette støtter opp under Barksdale and Itani (1989) som fant at angulære materialer gir bedre motstand mot permanente deformasjoner enn avrundede materialer på grunn av økt låsing og økt motstand mot skjærkrefter i kontaktpunktene mellom partiklene.

Også når det kommer til overflatetekstur viser studier at en røffere overflate gir økt friksjon i kontaktpunktene, og dermed mer motstand mot permanente deformasjoner. (Uthus, 2007) demonstrerte dette ved å sammenligne et materiale med 4 ulike kornformer:

1. Kubisk angulære partikler
2. Kubisk avrundede partikler
3. Flisig angulære partikler
4. Flisig avrundede partikler

Disse materialene vises også i Figur 2.2.



Figur 2.2 Fire testmaterialer med ulik angularitet eller kornform. (Uthus, 2007)

For å oppnå avrundede kanter ble disse materialene kjørt i en kulemøllertrommel i 60 minutter. Uthus (2007) fant at de kubisk angulære prøvene hadde signifikant større motstand mot permanente deformasjoner enn de kubisk avrundede, selv når det kubisk avrundede materialet hadde høyere densitet. Hun forklarer resultatene med at både angulariteten og overflateteksturen er faktorer som påvirker den interne friksjonen og dermed også endelig permanent deformasjon. Lavere intern friksjon gir mindre motstand mot permanente deformasjoner og da også mot spordannelser.

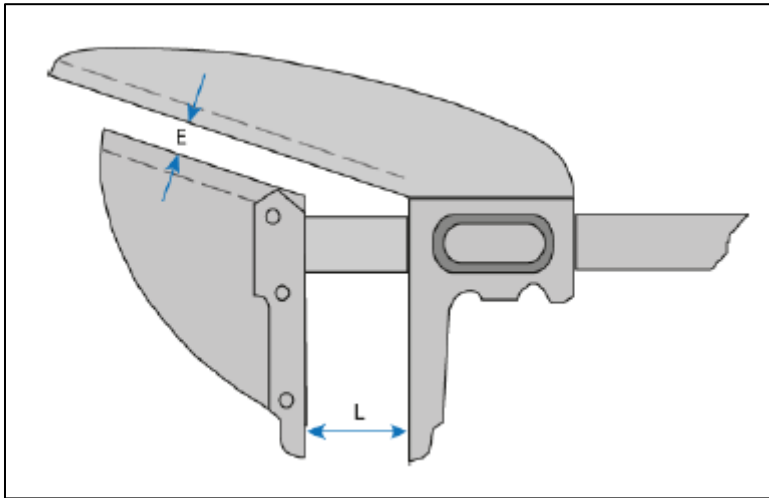
Uthus (2007) sin konklusjon støtter opp under Barksdale and Itani (1989) og Janoo and Bayer Ii (2001). Sistnevnte fant gjennom en laboratorieundersøkelse at et materiale bestående av avrundede partikler over tid ga større deformasjoner enn angulære partikler. Dette ble forklart ved at avrundede partikler enklere flytter seg i forhold til hverandre i mangel på friksjon i kontaktpunktene.

Denne oppgaven fokuserer imidlertid på det Rodriguez et al. (2013) beskriver som den største skalaen å betrakte kornformen gjennom, med fokus på partiklens diameter i ulike retninger. Dette blir evaluert ved hjelp av stenglighetsindeks og flisighetsindeks, og videre litteratursøk vil dreie seg om disse metodene, før enkelte andre metoder nevnes i delkapittel 2.1.4.

2.1.2 STENGLIGHETSINDEKS/FORMINDEKS

Stenglighetsindeks er en metode som måler andelen steinkorn der lengste dimensjon (lengde) er 3 ganger så stor som minste dimensjon (tykkelse), for en hel prøve. Målingene gjennomføres med et skyvelære konstruert for denne testen, som vist i Figur 2.3. Lengden defineres som et steinkorns største utstrekning, mens tykkelsen defineres som et steinkorns minste bredde (Statens vegvesen, 2016). Uthus et al. (2005) er mer presis når det kommer til disse definisjonene, og definerer lengden

som den største lengden mellom to plan som står tangentielt på partikkelen. Tilsvarende defineres tykkelsen som den korteste lengden mellom to plan som står parallelt på partikkeloverflaten.



Figur 2.3 Et skyvelære som brukes til å måle største og minste dimensjon. (Statens vegvesen, 2016)

Metoden kan etter NS-EN 933-4 benyttes for fraksjoner i området 4-63 mm, der prøven først blir delt opp i delfraksjoner. Resultatet oppgis i stenglighetsindeks (SI) og representerer prosentandelen stenglige korn i hele prøven, målt i masse (Norsk Standard, 2008).

Det er ikke angitt krav til stenglighetsindeks i hverken bundne eller ubundne materialer til vegbygging i Norge (Statens vegvesen, 2014).

Uthus et al. (2005) gjennomførte en laboratoriestudie av et gneismateriale som er mye brukt i norske vegkonstruksjoner. Fire ulike kornformer av materialet ble produsert med den hensikt å evaluere ulike metoder for determinasjon av kornform, med tanke på parametere som beskriver form, angularitet og overflatetekstur. Både stenglighetsindeks (shape index) og flisighetsindeks (flakiness index) ble vurdert i studien. Kornformene er vist i Figur 2.2.

Resultatene viser at både stenglighets- og flisighetsindeks relativt godt skiller mellom de ulike type materialene, som en kan se av Tabell 2. Likevel skiller stenglighetsindeksen seg klart ut med den drastiske forskjellen mellom de kubiske og flisige materialene. En annen tendens som en kan lese av samme tabell er at de avrundede materialene i større grad er flisige og stenglige sammenlignet med de angulære materialene.

Tabell 2 FI og SI for fire ulike materialer. Gjengitt etter Uthus et al. (2005).

Materialtype	Kornform	
	Stenglighetsindeks	Flisighetsindeks
Kubisk angulært	0,083	10,99
Kubisk avrundet	0,056	8,08
Flisig angulært	55,5	12,42
Flisig avrundet	63,3	20,34

I rapporten pekes det på at de såkalt flisige materialene i størst grad var utstrakte fremfor flisige. Dette kan dermed være årsaken til de høye verdiene for stengligheten. Siden stengligheten sammenligner største og minste dimensjon, vil det gi utslag i testen med en gang en dimensjon er særskilt stor eller særskilt liten. Det konkluderes med at både flisighets- og stenglighetsindeksen skiller godt mellom

materialer som har typisk flisige eller utstrakte korn, mens de egner seg dårligere til å skille mellom materialer som har mindre forskjeller i kornform (Uthus et al., 2005).

2.1.3 FLISIGHETSINDEKS

Flisighetsindeks er en meget hyppig benyttet metode for evaluering av kornform både i Norge og resten av Europa, med krav til grusmaterialer tiltenkt asfaltmaterialer (Uthus et al., 2005). Metoden for å finne flisighetsindeksen (FI) til et materiale består av to sikteoperasjoner. Først siktes prøven med kvadratiske åpninger for å dele prøven inn i angitte delfraksjoner, d/D , der d er minste diameter og D er største diameter for hver delfraksjon. Deretter siktes hver delfraksjon på sine respektive stavsikter, der spaltebredden for hver stavsikt til de ulike delfraksjonene tilsvarer $D/2$, som angitt i Tabell 3 (Statens vegvesen, 2016).

Tabell 3 Fraksjoner med tilhørende spaltebredde for stavsikter. (Statens vegvesen, 2016)

Fraksjon (d/D) (mm)	Spaltebredde stavsikt (mm)
80/100	50
63/80	40
50/63	31,5
40/50	25
31,5/40	20
25/31,5	16
20/25	12,5
16/20	10
12,5/16	8
10/12,5	6,3
8/10	5
6,3/8	4
5/6,3	3,15
4/5	2,5

Materialet som passerer stavsiktene i andre sikteoperasjon betegnes som flisig, og andelen flisig materiale for hver delfraksjon beregnes. Dette er da flisighetsindeksen for hver delfraksjon. Den endelige FI beregnes som summen av materiale som passerer stavsiktene sammenlignet med prøvens totale masse, målt i prosent. Formel 1 viser dette (Statens vegvesen, 2016).

$$FI = \frac{M_2}{M_1} * 100 \quad \text{Formel 1}$$

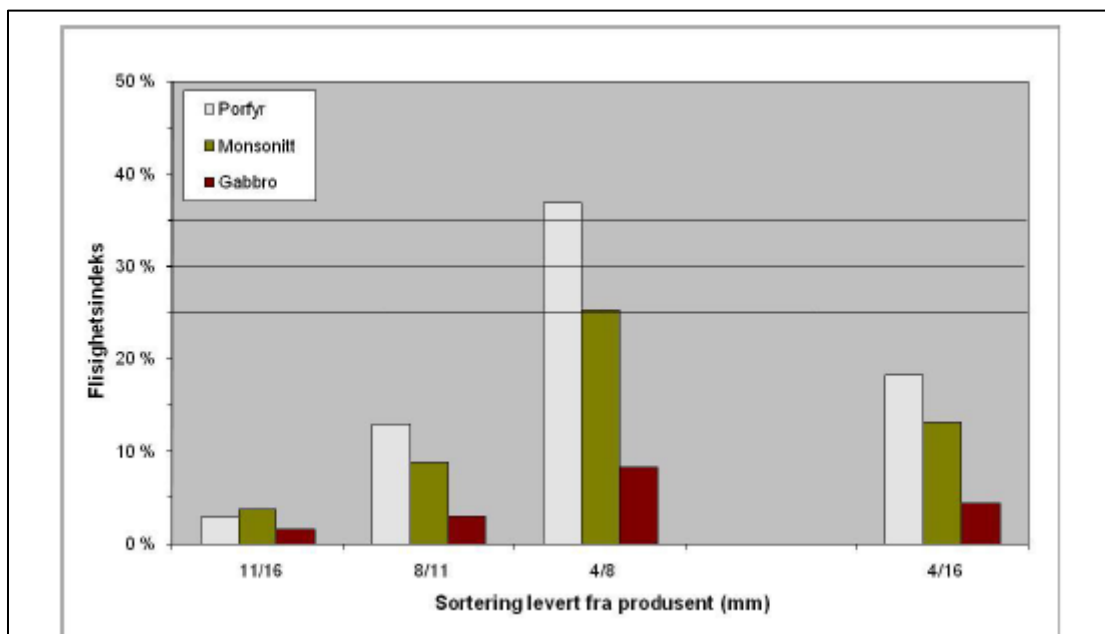
Der:

- M_1 = Summen av massene i alle fraksjoner målt i gram
- M_2 = Summen av massene av gjennomgang på stavsikt fra alle fraksjoner målt i gram

I Norge varierer kravene til flisighetsindeks for steinmaterialer i asfaltdekker fra ≤ 25 til ≤ 35 , avhengig av produksjonsmetode for asfalten og ÅDT. Det er kun krav til den endelige flisighetsindeksen og ikke for delfraksjonene som materialene består av (Statens vegvesen, 2014).

Gjeldende krav til flisighetsindeks for mekanisk stabiliserte bærelag av knust grus eller knust fjell tilsier en flisighetsindeks ≤ 35 (Statens vegvesen, 2014). Dette kan ved årsskiftet 2017/2018 endre seg da høringsutgaven av N200 foreslår en innstramning av dagens krav til ≤ 25 for mekanisk stabiliserte materialer i bærelag (Vegdirektoratet, 2017).

Erichsen (2013) er kritisk til dagens ordning med at det kun er krav til den endelige flisighetsindeksen for hvert materiale og argumenterer for en endring. Han mener at dagens krav til FI ikke er tilfredsstillende for å sikre høy nok materialkvalitet på tilslagsmaterialer til asfalt ettersom enkeltfraksjoner med god margin kan overstige kravene. Figur 2.4 eksemplifiserer dette, der flisighetsindeksen for delfraksjonene til tre bergarter vises, samt snittverdien som blir sammenlignet med gjeldende krav.



Figur 2.4 Flisighetsindeks for ulike sorteringer og materialer. (Erichsen, 2013)

Tidligere ble kornform blant annet vurdert gjennom flisighetstallet, f . Det er meget godt samsvar mellom flisighetsindeksen og flisighetstallet, spesielt når differansen mellom største og minste kornstørrelse i hver delfraksjon er lav (Erichsen, 2013). Flisighetstallet defineres gjennom Formel 2 (Viman and Broms, 2005);

$$f = \frac{b_{50}}{t_{50}} \quad \text{Formel 2}$$

Der:

- b_{50} er steinenes medianbredde
- t_{50} er steinenes mediantykkelse

Partikkelformen til knuste steinmaterialer avhenger av geologien til materialet og produksjonsfaktorer ved knuseverket. Generelt vil sterke materialer gi økt flisighet. Samtidig er finkornede ignøse materialer skjørere enn grovkornede, hvilket også vil gi en høyere andel flisige partikler. Av iboende egenskaper i morssteinen tenderer eventuell anisotropi mot å gi økt flisighet (Ramsay et al., 1974).

Chytla et al. (1995) sammenlignet tre metoder for evaluering av steinmaterialers kornform; flisighetstall, flisighetsindeks og stenglighetsindeks. 7 ulike materialer med god styrke ble valgt ut i studien, med den hensikt å inkludere både kubisk og flisig kornform slik at eventuelle forskjeller enklere ble observert. Tabell 4 viser en oversikt over materialene, samt kulemølleverdi og sprøhetstall (som er mål på mekanisk styrke).

Tabell 4 Kornformsevaluerte materialer, samt kulemølleverdi og sprøhetstall. (Chytla et al., 1995)

Mate- rial nr	Bergart	Kul- kvarns- värde	Spröd- hetstal
1	finkornig granit, grönsten, porfyr mm	-	-
2	samma som nr 1; kubiserat	-	25
3	granitrikt naturgrus med grönsten, gnejs och porfyr; kubiserat	9,7	40
4	diabas	7,3	24
5	kvartsit med inslag av kvarts, granit och gnejs	6,6	44
6	finkornig, homogen granit	6,4	33
7	porfyrrikt naturgrus med granit, gnejs mm	4,6	34

Resultatene av studien viser, både gjennom flisighetsindeks og stenglighetsindeks, at grovere fraksjoner generelt har en mer kubisk kornform enn finere fraksjoner (Chytla et al., 1995). Lignende trend er observert av Viman and Broms (2005) som fant at flisigheten hos kornene i et ballastmateriale varierer med kornstørrelsen. Videre fant Chytla et al. (1995) størst korrelasjon mellom stenglighet og flisighet. Tabell 5 viser FI- og SI-resultatene sammen med korrelasjonsfaktoren r , som viser høy korrelasjon ($r=0,98$).

Tabell 5 Flisighet og stenglighet for syv materialer. (Chytla et al., 1995)

Material	Flakiness index FI	Shape index SI
Mat. 1	22	41,2
Mat. 1a	36	54,9
Mat. 2	7	9,6
Mat. 3	8	13,1
Mat. 4	16	20,7
Mat. 5	16	21,6
Mat. 5a	24	37,6
Mat. 5b	17	25,7
Mat. 6	10	15,8
Mat. 7	16	22,9

Korrelasjon FI / SI = 0,98

Chytla et al. (1995) bemerker at denne korrelasjonen er påvist til tross for at flisighet og stenglighet undersøker ulike forhold hos kornene, men korrelasjon kan komme av at en i begge tilfeller identifiserer «misdannede» korn. Som regel er flisige materialer også stenglige, men unntak kan likevel forekomme. Dette blir imidlertid ikke fanget opp i studien i særlig grad.

Stavsiktene som brukes for å finne flisigheten er utformet slik at minste dimensjon av partiklene kan passere åpningene. For stengligheten sin del vurderes minste dimensjon direkte. Derfor, ettersom den minste dimensjonen inngår i begge testene, er det naturlig å forvente en korrelasjon.

Den tradisjonelle sikteanalysen som også benyttes ved utføring av flisighetsindeksen har blitt kritisert fra flere hold. Persson (1998) påpeker at sikteprosedyrer, og metoder som involverer dette, begrenser seg til visse kornstørrelser av praktiske årsaker. Andersson (2010) mener billedanalyse bør ta over som metode for evaluering av kornstørrelsesfordeling da sikteanalyse både er lite tidseffektivt og dyrt. Mer relevant i denne sammenhengen er funnene Lees gjorde på 1960-tallet. Han fant at volumet som passerte siktene i den tradisjonelle sikteanalysen varierte stort med kornformen, og at stangformede partikler i gjennomsnitt har 2,5 ganger så stort volum som diskformede partikler (Uthus et al., 2005). Fernlund (1998) støtter opp om kritikken og påpeker at metoden ikke gir et eksakt mål på noen av dimensjonene til partiklene, og at det i bunn og grunn er partikkelformen som avgjør hvorvidt de passerer gitte sikt eller ikke. Mer presist, er det det minste tverrsnittsarealet som er den viktigste faktoren, og lengste dimensjon har liten eller ingen betydning. Hvis en partikkel er kurvet vil partikkelen rotere rundt sikten og passere.

2.1.4 ANDRE METODER FOR BESKRIVELSE AV KORNFØRM

Allerede i 1922 kvantifiserte Wentworth steinpartiklers form ved å måle lengde, bredde og tykkelse (Blott and Pye, 2008). Wadell (1932) påpekte tidlig problemene ved å måle partikler ved hjelp av største, mellomliggende og minste dimensjon. To partikler, der en av dem har ekstremt ulike

dimensjoner og en annen har tilnærmet like dimensjoner, kan gi samme «størrelse» som resultat. Likevel er det store forskjeller mellom disse to partiklene både når det kommer til form og volum, og de vil ventelig derfor ha ulik materialoppførsel, poengterte Wadell (1932). Han forsøkte derfor å beskrive kornformen gjennom parameteren «sfærisitetsgrad», som viser i hvor stor grad hver partikkel er formet som ei kule.

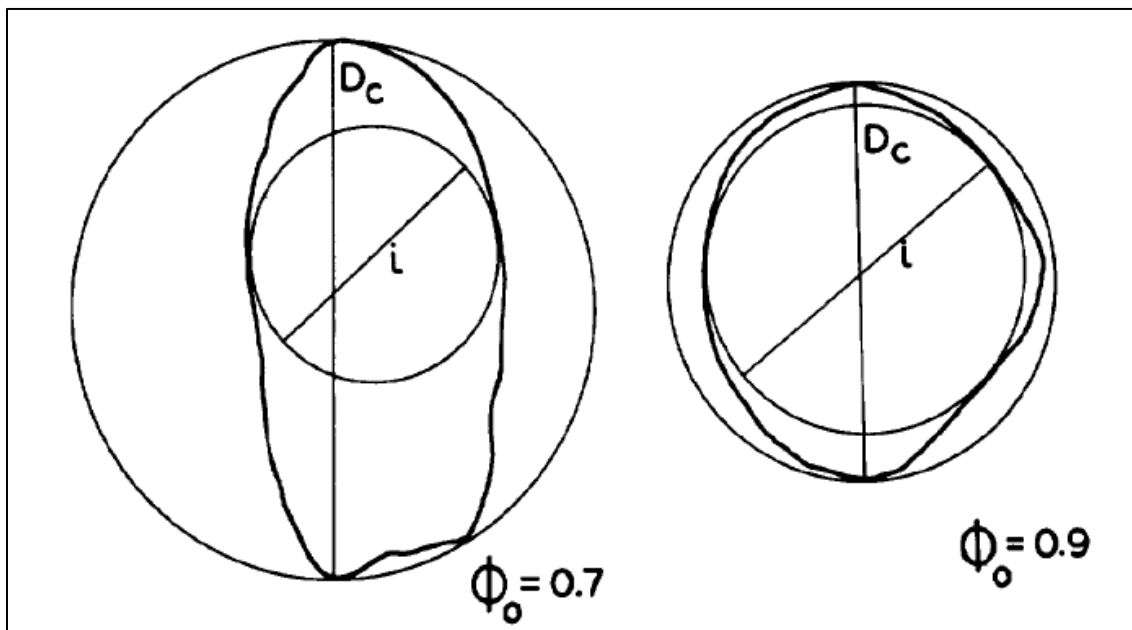
(Krumbein, 1941) videreførte målingene av tre dimensjoner og utviklet av dette et diagram som muliggjorde en relativt rask analyse av sfærisiteten til kornene. Sfærisiteten varierer fra 0 til 1, der 1 innebærer en perfekt sfærisk form.

En annen metode ble utviklet av Zingg noen år tidligere, og også denne bygger på målinger av partiklenes tre dimensjoner. Han delte partiklene opp i følgende kategorier (Krumbein, 1941):

1. Diskformet
2. Sfærisk
3. Bladformet
4. Stangformet

Mange ulike formfaktorer som tar utgangspunkt i partiklenes tre dimensjoner har siden blitt introdusert, med ulike vinklinger for hvordan disse målingene best skal gjennomføres (Rodriguez et al., 2013).

(Riley, 1941) arbeidet på sin side videre med Wadells metode og tok utgangspunkt i innskrevet og omskrevet sirkel som omslutter hver partikkel for å beskrive kornformen som vist på Figur 2.5.



Figur 2.5 Innvendige og utvendige sirkler basert på tverrsnittets største diameter. (Riley, 1941)

En kommer i metoden frem til «innskrevet sirkelsfærisitets», Φ_0 , som vist i Formel 3,

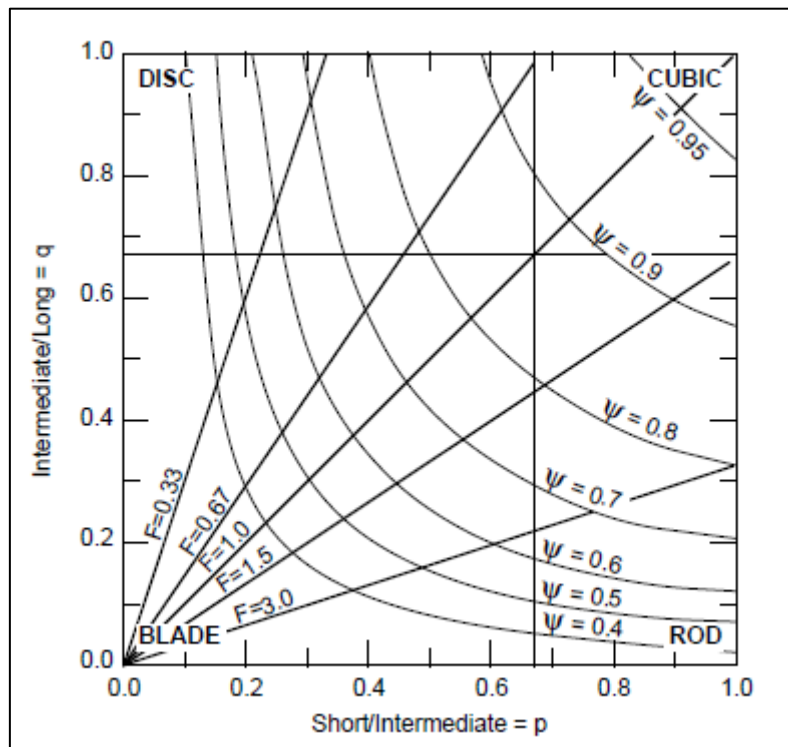
$$\Phi_0 = \sqrt{\frac{i}{D_c}} \quad \text{Formel 3}$$

der;

- i er diameteren til innskrevet sirkel

- D_c er diameteren til omskrevet sirkel

Lees kommenterte i 1964 Zinggs fire kategorier ved å fastslå at det i forskningsøyemed sannsynligvis er mer hensiktsmessig å definere partiklenes flathetsrate («flatness ratio») og langhetsrate («elongation ratio») for så å legge dette inn i rammeverket til Zingg (Barksdale and Itani, 1989). Flathetsraten er korteste dimensjon dividert på mellomliggende dimensjon, mens langhetsraten er mellomliggende dimensjon dividert på største dimensjon. Figur 2.6 viser Lees klassifiseringsdiagram for de ulike kornformene (Janoo, 1998).



Figur 2.6 Lees klassifiseringsdiagram for kornformer. (Janoo, 1998)

Janoo (1998) systematiserte beskrivelsene av de fire kornformklassene basert på beskrivelser av Lees og Barksdale and Itani (1989). Dette er oppsummert i Tabell 6, som inkluderer den opprinnelige språkdrakten for å forhindre eventuelle misforståelser ved oversetting.

Tabell 6 Skriftlig beskrivelse av fire kornformklasser, inkludert oversettelse. Gjengitt etter Janoo (1998).

Kornform	Description (engelsk)	Beskrivelse
Diskformet	Slabby in appearance, but not elongated	Plateformet, men ikke langstrakt
Likedimensjonal	Neither slabby appearance nor elongated	Hverken plateformet eller langstrakt
Bladformet	Slabby appearance	Plateformet
Stangformet	Elongated, but not slabby in appearance	Langstrakt, men ikke plateformet

Ved å kombinere flathetsraten (p) og langhetsraten (q) beskrev Lees partikkelformen gjennom en formfaktor, F og sfærisiteten, ψ .

$$F = \frac{p}{q} \quad \text{Formel 4}$$

En sfærisk eller kubisk partikkel vil ha samme utstrekning i alle tre dimensjoner og derfor gi en formfaktor lik 1. Hvis $F < 1$ vil partikkelen være mer utstrakt enn tynn, mens $F > 1$ tilsvarer en mer bladformet partikkel (Janoo, 1998).

Sfærisiteten, som er definert utallige ganger i litteraturen, ble av Lees definert som Formel 5 viser;

$$\psi = \frac{12,8 * (\sqrt[3]{p^2q})}{1 + p(1 + q) + 6\sqrt{1 + p^2(1 + q^2)}} \quad \text{Formel 5}$$

Sfærisiteten varierer fra 0 til 1, der 1 innebærer en perfekt sfærisk form (Janoo, 1998).

Uthus et al. (2005) evaluerte også Lees' metode for de fire materialene som vises i Figur 2.2. Hun konkluderer med at metoden i liten grad skiller mellom de ulike prøvene i studien, og peker på at fysiske målinger av dimensjonene, som er en utfordrende øvelse når det er snakk om irregulære partikler, kan være en årsak til dette.

Metoden som etter all sannsynlighet vil bli dominerende i årene som kommer er billedanalyse. Det finnes flere ulike metoder som er under utvikling innen dette feltet der teknologien baserer seg på blant annet Fourier-rekker som lager matematiske uttrykk som etterligner profilen til partiklene, ortogonale billedanalyser som innebærer bruk av to bilder som står vinkelrett på hverandre og 3D laserscanning. Også fraktal dimensjon, der en deler opp en fraktal linje (irregulær på hvert granskingsnivå) opp i mindre deler og summerer disse, og såkalt Feretdiameter som måler avstanden mellom to parallelle linjer, er metoder som blir eller har blitt utviklet for å evaluere partikkelformen til steinmaterialer (Rodriguez et al., 2013).

Billedanalyse har noen helt klare fordeler. Bildene bevarer sin kvalitet (oppløsning) ved lagring og deling og teknologisk fremskritt vil effektivisere metoden i årene som kommer. I tillegg er metoden preget av objektivitet (Rodriguez et al., 2013).

Uthus et al. (2005) fant at 3D billedanalyse var den metoden som best korrelerte med det de i studien visuelt observerte av materialene. Hun konkluderer videre med at mens 2D billedanalyse i liten grad skiller mellom de knuste og avrundede materialene, så er 3D billedanalyse den beste metoden for høykvalitetsresultater.

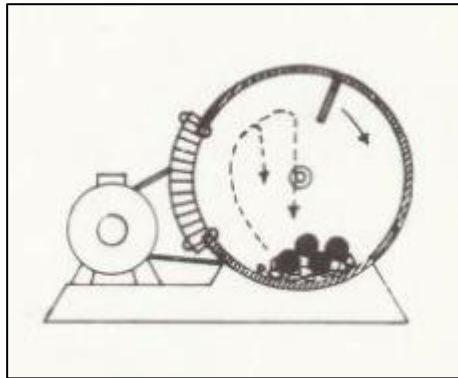
2.2 METODER FOR BESKRIVELSE AV MEKANISK STYRKE

Grusmaterialers mekaniske styrke består av følgende to komponenter; motsand mot nedknusing og motstand mot slitasje. I Norge benyttes Los Angeles-testen til å beskrive et materiales motstand mot knusing, mens micro-Deval beskriver motstanden mot slitasje. Disse to testene er også benyttet i oppgaven og fokuset i litteratursøket er derfor rettet dit hen.

2.2.1 LOS ANGELES

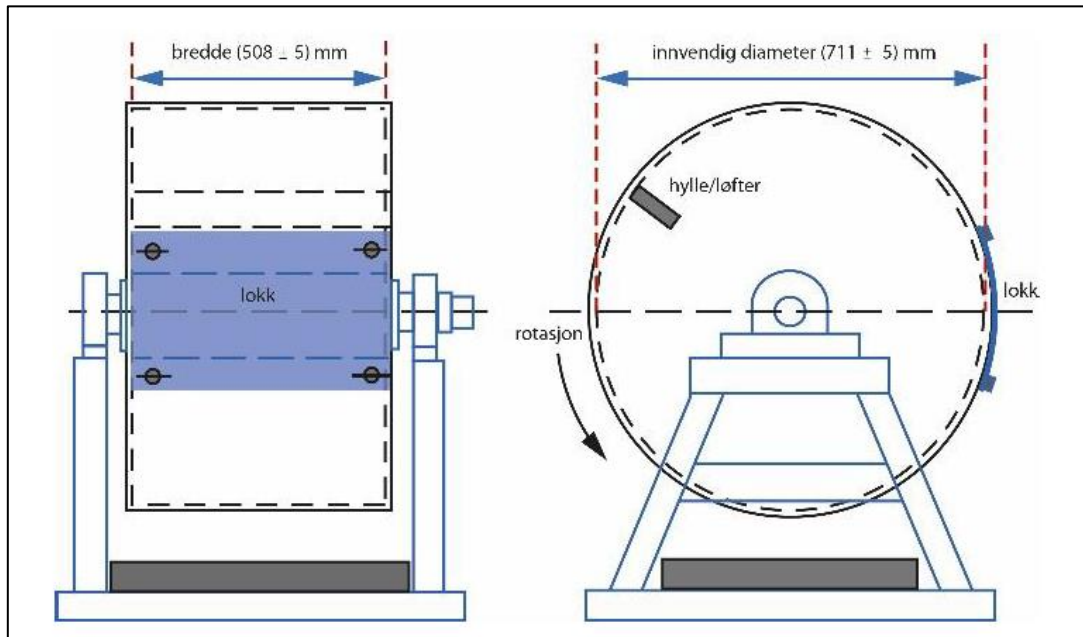
LA-testen ble utviklet i Los Angeles på 1920-tallet og innebærer at prøvematerialet, vanligvis 10-14 mm eller 31,5-50 mm, plasseres i en trommel sammen med et visst antall stålkuler. Når trommelen roterer vil en hylle inne i trommelen dra med seg materialet og stållballene frem til dette faller rundt 70 cm til motsatt side av trommelen. Dette vises på Figur 2.7. I fallet blir materialet utsatt for sammenstøt og knusing, mens det blir utsatt for abrasjon og sliping frem til hyllen på nytt drar med seg materialet og utsetter det for knusing (Prowell et al., 2005). Testen tallfester et materiales bestandighet (først og

fremst mot knusing) ved at en måler mengde nedknust materiale etter tromling (Statens vegvesen, 2016).



Figur 2.7 Hyllen bidrar til løfting av materialet og kulene. (Selmer-Olsen, 1980)

Ved testing av standardfraksjonen 10-14 mm, som er gjort i oppgaven, skal 60-70 % bestå av 10-12,5 mm-materiale og 30-40 % bestå av 12,5-14 mm-materiale. Delfraksjonene skal vaskes og tørkes før oppveing til ferdig prøve, som skal bestå av 5000 g materiale, med en feilmargin på 5 g. 11 stålballer, hver med diameter mellom 45 og 49 mm og vekt mellom 400 og 445 g, legges forsiktig i trommelen. Total masse for stålballene skal være mellom 4690 og 4860 g. Prøven legges så i trommelen og lokket festes før den tromles på 500 omdreininger med en hastighet på 31-33 omdreininger per minutt (som tilsvarer rundt 15 min. tromletid) (Norsk Standard, 2010). Figur 2.8 viser det prinsipielle oppsettet av et Los Angeles-apparat.



Figur 2.8 LA-trommel med enkelte mål. (Statens vegvesen, 2016)

Etter tromling vaskes og tørkes prøven (det kan være lurt å tørrsikte prøven først for å bli kvitt det meste av finstoffet) og materialet større enn 1,6 mm veies og rapporteres. LA-verdien beregnes etter Formel 6;

$$LA = \frac{(5000 - m)}{50} \quad \text{Formel 6}$$

- der m er vekt av materiale større enn 1,6 mm, angitt i hele gram.

LA-verdien skal oppgis i heltall (Norsk Standard, 2010). De krav som stilles til LA-verdier for både bundne og ubundne materialer tiltenkt vegkonstruksjoner i Norge gjelder alltid for 10-14 mm-fraksjonen, og kravene varierer fra ≤ 40 til ≤ 15 for asfaltdekker og ≤ 40 til ≤ 30 for ubundne lag (Statens vegvesen, 2014). Lavere LA-verdi tilsier et mer bestandig materiale.

L_{Ax}-verdien er av Benediktsson and Wigum (2015) definert som prosentandelen materiale som passerer nedre sikt i testfraksjonen. Dette er videre benyttet i denne oppgaven, og L_{Ax}-verdien betegner alltid prosentandelen materiale mindre enn 10 mm (LA₁₀) ettersom det kun er standardfraksjonen som er testet. En finner først Los Angeles restverdi (L_{Ar}), som er definert som prosentandelen gjenværende masse i nedre sikt i testfraksjonen, vha. Formel 7;

$$L_{Ar} = \frac{M_1}{M_2} \quad \text{Formel 7}$$

Der

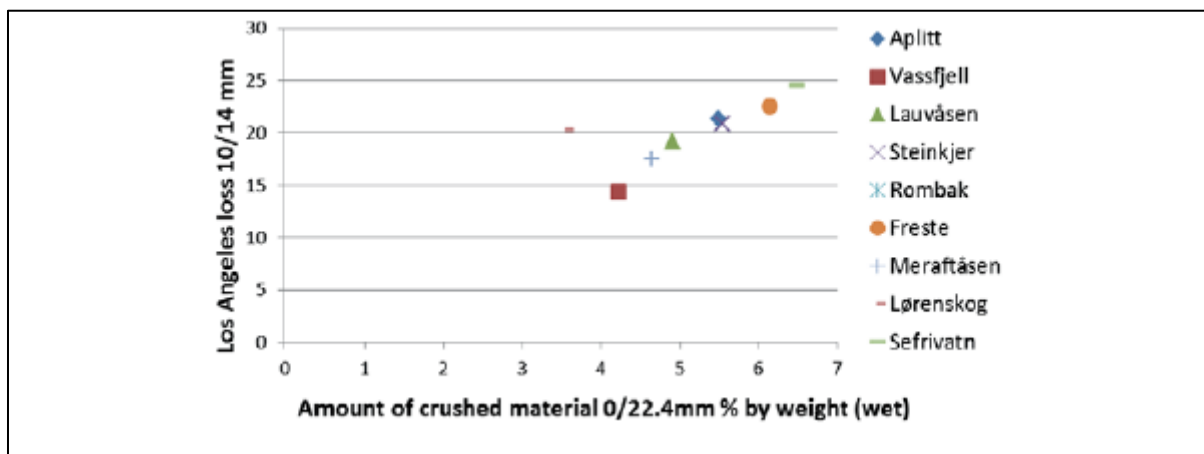
- M₁ er gjenværende masse på nederste sikt i testfraksjonen i gram
- M₂ er den initielle massen av prøven i gram

Videre finner en L_{Ax}-verdien gjennom Formel 8. Lavere L_{Ax}-verdi tilsvarer økt motstand mot nedknusing og abrasjon (Benediktsson and Wigum, 2015).

$$LA_x = 100\% - LA_r \quad \text{Formel 8}$$

Til tross for at Los Angeles er en utbredt standardisert europeisk metode, er flere svakheter ved testen påvist.

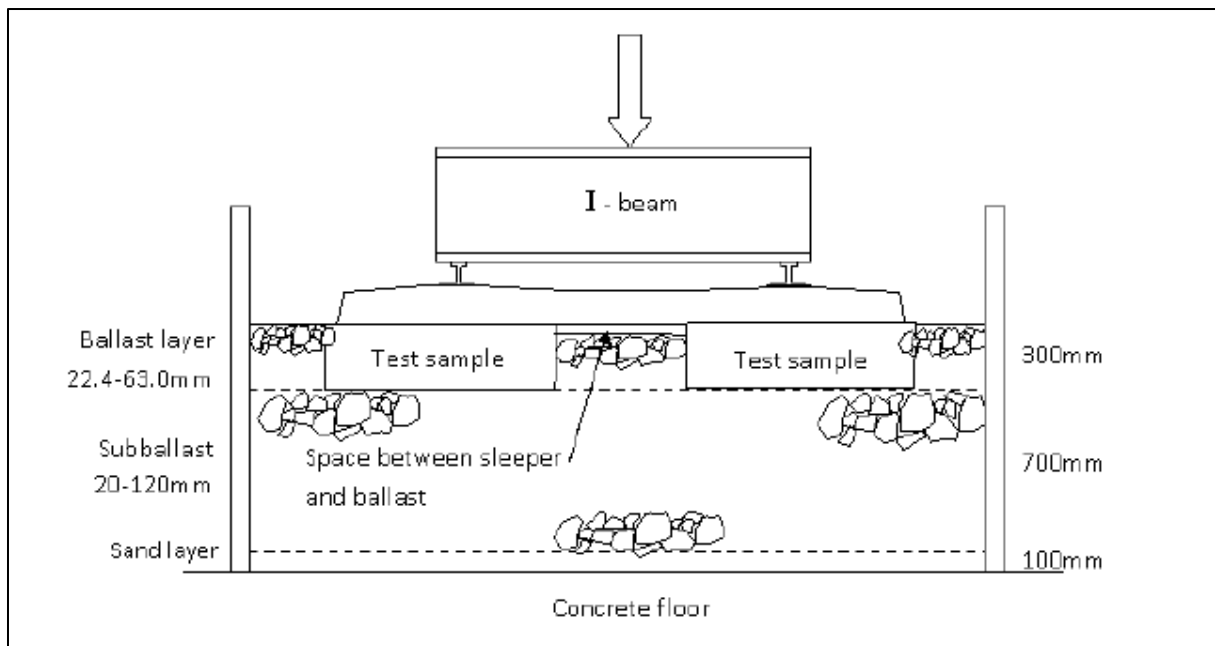
Nålsund (2014) undersøkte i hans gjennomarbeidede doktorgradsavhandling blant annet korrelasjonen mellom LA-verdier og nedknusing av ballastmateriale (22,4-63 mm) i en stor treaksialtest og i en fullskala testmodell. Lastprosedyren for treaksialtesten ble gjort gjennom fire steg med én million lastsykluser per steg. Nedknust materiale er definert som 0-22,4 mm-materiale, hvilket ble fjernet etter hvert steg. Både tørt og vått materiale ble testet for LA, samt standardfraksjonen 10-14 mm og ballastfraksjonen 31,5-50 mm. Korrelasjonen viste seg å være svak for LA-verdiene til 31,5-50 mm-materialet, men overraskende høy mellom standardfraksjonen og mengden knust materiale i den store treaksialtesten (Figur 2.9).



Figur 2.9 Sammenheng mellom nedknusing i LA-testen og stor treaksialtest. (Nålsund, 2014)

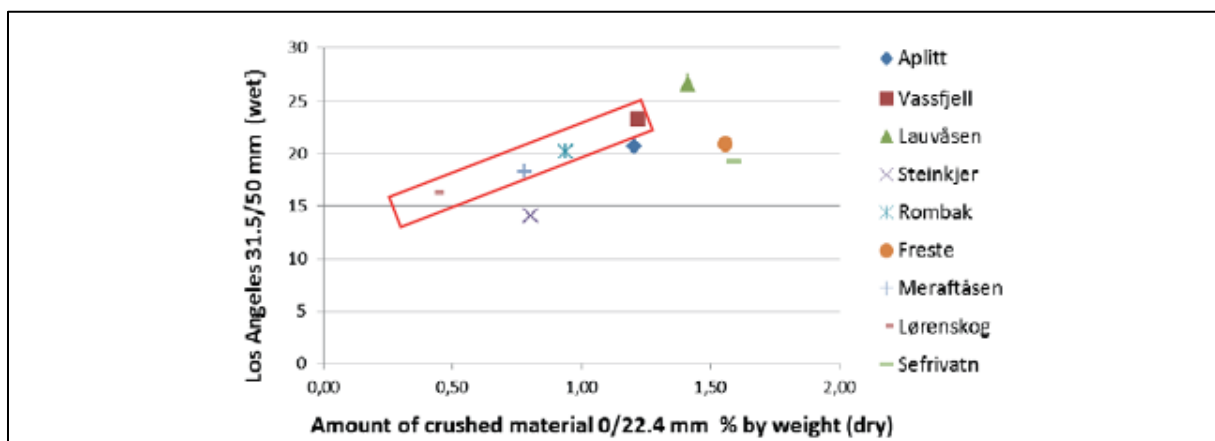
Nålsund (2014) peker på at degraderingen under både en LA-test med 10-14 mm-fraksjonen og treaksialtesten i hovedsak består av knusing og ikke abrasjon, hvilket kan være avgjørende for den høye korrelasjonen. (Hvilken nedbrytningseffekt som dominerer ved de ulike fraksjonene i LA-testen vil bli tatt opp senere i delkapittelet.)

For å simulere last fra jernbane ble det i forbindelse med Nålsund (2014) sine arbeider bygget en fullskala testmodell. Figur 2.10 viser prinsipielt oppsett for denne.



Figur 2.10 Prinsipielt oppsett av fullskala testmodell for jernbane. (Nålsund, 2014)

Også her ble ballastmaterialet 22,4-63 mm testet og mengden knust materiale er igjen definert som 0/22,4 mm-materiale. Korrelasjonen viste seg å være størst ved vått materiale i LA-testen, som vises i Figur 2.11, men Nålsund (2014) utelukker ikke at dette skyldes statistiske variabler.



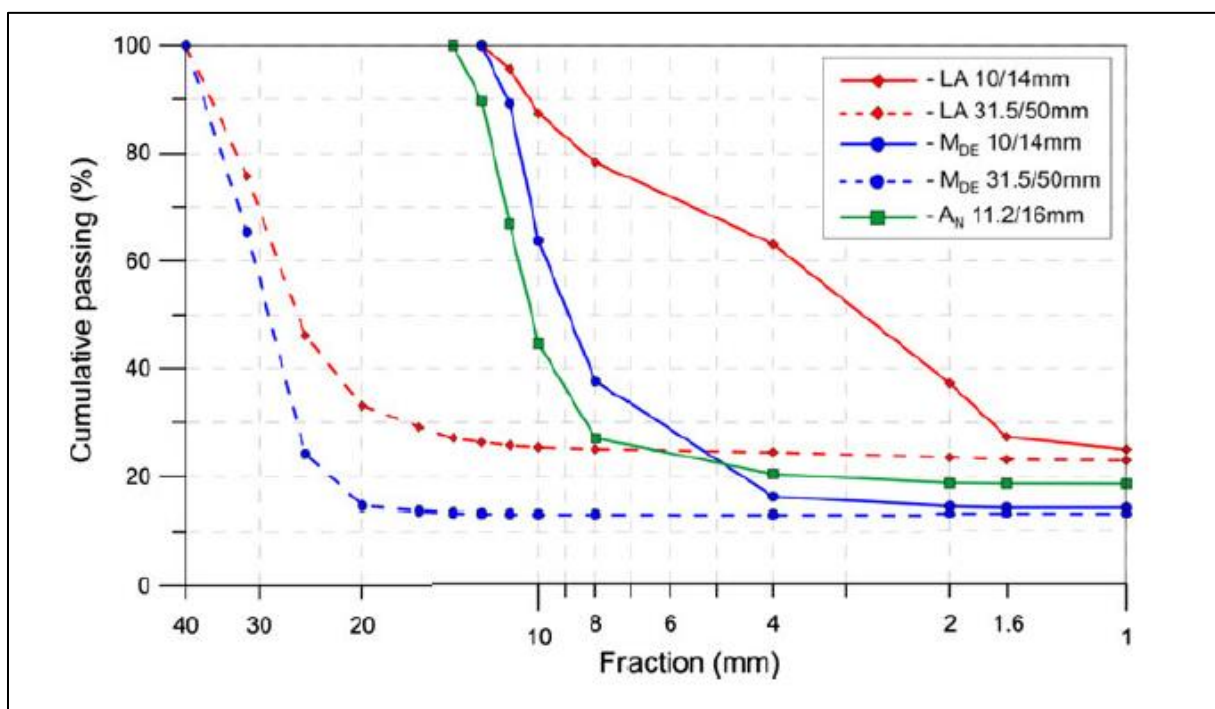
Figur 2.11 Sammenheng mellom knust materiale ved fullskala testmodell og LA-test med vått ballastmateriale. (Nålsund, 2014)

Som følge av liten korrelasjon mellom fullskala testmodell og LA-verdier, og med antagelsen om at testmodellen er en god simulering av faktiske forhold i en jernbanekonstruksjon gjeldende, så konkluderer Nålsund (2014) med at LA-testen er en lite troverdig metode for å predikere degradering av ballastmaterialer. Han konkluderer også at LA-metoden ikke egner seg til å skille mellom middels sterke materialer.

Til tross for Nålsunds kritikk av LA-metoden regnes treaksialtesten som en god metode for å simulere spennings situasjonen for ubundne materialer i en vegkonstruksjon (Hoff, 2008), og korrelasjonen viste seg som nevnt å være større mellom stor treaksialtest og LA-verdiene for standardfraksjonen.

Også Erichsen et al. (2011) påpeker at LA-metoden for ballastmateriale (31,5-50) i større grad er en abrasjonstest enn en knusetest, sammenlignet med standardfraksjonen. Dette ble undersøkt ved å analysere korngraderingskurvene til materialer etter mølletestene Los Angeles, micro-Deval og Nordisk kule mølle. En ensgradert kurve med liten spredning i kornstørrelser indikerer at det i all hovedsak er blitt produsert finstoff og er et tegn på at abrasjon er den dominerende nedbrytningseffekten. En velgradert kurve med stor spredning i partikkelstørrelser er derimot en indikasjon på at knusing er dominerende nedbrytningseffekt. Forfatterne argumenterer videre med at doblingen av prøvemateriale for ballastfraksjonen (10 kg) ift. standardfraksjonen (5 kg) hindrer fragmentering, og at en ekstra stållball (12 mot 11 i standardfraksjonen) ikke er nok til å opprettholde nedknusing som den dominerende nedbrytningseffekten.

Erichsen et al. (2011) fant videre at LA-testen for standardfraksjonen skilte seg fra de øvrige testene i form av at denne tydelig er karakterisert av knusing fremfor abrasjon. Figur 2.12 viser at kornkurven til materialet etter LA-testen for standardfraksjonen tydelig er mer velgradert enn de øvrige materialene.



Figur 2.12 Kornkurver etter ulike mølletester. (Erichsen et al., 2011)

Fernlund (2005) påpeker at forskjellige grusmaterialer kan gi like LA-resultater, men likevel være nedknust på vidt forskjellige måter. Eksempelvis kan det være en uniform nedknusing av alle partikler, eller så kan kun de lengste og tynneste partiklene være knust, noe LA testen i seg selv ikke gir noe informasjon om.

Erichsen (2013) argumenterer for en kombinert kravsetting til både finstoffproduksjon <1,6 mm og andelen materiale som er igjen innenfor opprinnelig prøvefraksjon da dette vil gi mer innsikt i de faktiske materialegenskapene. Ved også å analysere LAx er det enklere å rangere materialer og velge

de mest bestandige. Stenlid (1996) kommenterer at det å utvide analyseområdet vil være fordelaktig da det kan gi en indikasjon på hva slags nedbrytningsmekanisme som er aktiv. Likevel, påpeker Erichsen (2013), så er det spesielt i Norden viktig å finne LA-verdien på grunn av faren for dannelse av telefarlige materialer.

Også ved tolkning av resultatene til metoden bør en være observant på gjeldende litteratur. Senior and Rogers (1991) fant at myke materialer med dårlige slitasegenskaper likevel kan få høye LA-verdier ettersom disse i større grad absorberer sammenstøtene og deformerer heller enn knuses, hvilket gir gode LA-verdier. Erichsen (2013) kommenterer ikke årsaken, men er inne på noe av det samme når han bemerker at bergarter med dårlige slitasegenskaper, gjerne på grunn av høyt glimmer- og/eller kalkinnhold, har en tendens til å gi «for gode» resultater i LA-testen.

I tillegg til dette er ikke LA-testen uniform. Den utsetter materialet for både abrasjon og knusing, og materialer med dårlig slitasjemotstand får i større grad abrasiv nedbrytning, hvilket kjennetegnes ved at de grovere kornene får avrundet form etter testing. Resultatet avhenger derfor av materialenes iboende knuse- og slitasegenskaper (Erichsen, 2013).

Da det i oppgaven kun er én bergart som testes, et granodiorittmateriale, er problemstillingen rundt det at LA-testen ikke er uniform ikke relevant. Det kan likevel være hensiktsmessig å være observant på at den økte rundingsgraden som materialene eventuelt får som følge av testen sannsynligvis er abrasiv nedbrytning.

Granodiorittmaterialet inneholder ikke glimmer eller kalk (Store norske leksikon, 2017). Videre anses det som en fordel at knusing er den dominerende nedbrytningseffekten ved LA-testen for standardfraksjonen, siden det da fortrinnsvis er én knusetest og én slitasetest som benyttes som sammenligningsgrunnlag med kornformen i oppgaven.

2.2.2 MICRO-DEVAL

Micro-Deval-metoden ble utviklet i Frankrike på 1960-tallet og har ifølge Senior and Rogers (1991) vist seg å skille godt mellom lav- og høykvalitetsmaterialer. Metoden er en abrasjonstest med den hensikt å belyse ulike materialers slitestyrke og simulerer slitasjen som ubundne materialer utsettes for i bære- og forsterkningslag (Ulvik, 2012, Statens vegvesen, 2016). Også her utføres normalt testen på 10-14 mm-fraksjonen, men den kan også benyttes på ballastfrakskjonen 31,5-50 mm samt alternative fraksjoner mellom 4-16 mm (Norsk Standard, 2011). I denne oppgaven er det standardfraksjonen 10-14 mm som har blitt testet.

For hver test kjøres to paralleller og micro-Deval-verdien beregnes som gjennomsnittet av disse. I det følgende er testen beskrevet slik den gjennomføres for hver av parallellene. Stålkuler med en total vekt på 5000 g (± 5 g) og hver med en diameter på 10 mm ($\pm 0,5$ mm) plasseres i trommelen. Deretter tilsettes prøvematerialet bestående av 500 g (± 2 g) 10-14 mm-materiale, der 60-70 % består av 10-12,5 mm-materiale og 30-40 % består av 12,5-14 mm-materiale. Dette er på forhånd vasket og tørket slik det er beskrevet i Norsk Standard (2011). Før trommelen lukkes tilsettes 2500 ml (± 50 ml) vann, og to av disse kjøres med en rotasjonshastighet på 100 (± 5) omdreininger per minutt i 12 000 rotasjoner (± 10). Dette tilsvarer en kjøretid på rundt to timer. Ved fullført tromling vaskes hver parallell for seg, stålkulene fjernes og materiale større enn 1,6 mm siktes ut og tørkes. Micro-Deval-koeffisientene beregnes ut ifra Formel 9 og Formel 10, og gjennomsnittet av M_{DE1} og M_{DE2} utgjør den endelige micro-Deval-verdien (Norsk Standard, 2011).

$$M_{DE1} = \frac{500 - m_1}{5}$$

Formel 9

$$M_{DE2} = \frac{500 - m_2}{5}$$

Formel 10

- $M_{DE(1,2)}$ er analyseverdien for hver parallell
- $m_{(1,2)}$ er summen av materiale større enn 1,6 mm for hver parallell

Figur 2.13 viser micro-Deval-apparatet som er benyttet i oppgaven, lokalisert ved Statens Vegvesens Sentrallaboratorium i Trondheim.



Figur 2.13 Micro-Deval-apparatet som står på Sentrallaboratoriet i Trondheim.

Erichsen (2013) viser, som for LA-testen, hvordan en gjennom analyse av kornfordelingskurver kan determinere den mest fremtredende nedbrytningsmekanismen. Kornfordelingskurvene til både 10-14 mm-materialet og 31,5-50 mm-materialet i Figur 2.12 er ensgraderte, hvilket indikerer at metoden påfører materialene slitasje. Det er hovedsakelig ytterkantene av partiklene som brytes ned til finstoff, og de får kun en mindre størrelsereduksjon som følge av denne nedbrytningsmekanismen.

MDr- og MDx-verdiene ble av Benediktsson and Wigum (2015) vurdert til å øke analyseområdet ved metoden. Micro-Deval restverdi (MDr) defineres som prosentandel gjenværende masse på nedre sikt i testfraksjonen, hvilket tilsvarer 10 mm for standardfraksjonen. MDr beregnes ved hjelp av Formel 11 (Benediktsson and Wigum, 2015);

$$MD_r = \frac{M_2}{M_1} * 100 \quad \text{Formel 11}$$

Der

- M_1 er vekten av gjenværende masse på nedre sikt i testfraksjonen i gram
- M_2 er den initielle vekten av prøven i gram

MD_x defineres som prosentandelen masse som passerer nedre sikt i testfraksjonen og kan beregnes gjennom Formel 12. Lavere MD_x-verdi tilsier at materialet gir bedre motstand mot slitasje (Benediktsson and Wigum, 2015).

$$MD_x = 100\% - MD_r \quad \text{Formel 12}$$

Rundingsgradsanalyse innebærer, som navnet tilsier, en analyse av hvor avrundet materialene har blitt i kantene som følge av de ulike trommeltestene. For micro-Deval viser det seg at et slitesterkt materiale som jaspis kun oppnår en kantrundet form for de fleste fraksjonene, mens bergarter med dårlig slitasjemotstand (kalkstein) får en rundet til godt rundet form. Dette tilsier stor slitasje (Erichsen, 2013).

Micro-Deval-metoden har vist seg å korrelere godt med faktiske forhold for tilslagsmaterialer i asfalt. Wu et al. (1998) evaluerte ulike tester for bestandighet og motstand mot slitasje for tilslagsmaterialer i asfaltbetong, og forsøkte å avdekke hvilke av disse metodene som best korrelerer med faktiske forhold. 16 grusmaterialer av ulik kvalitet ble benyttet, og micro-Deval viste seg å ha god korrelasjon med asfaltbetongens ytelse i felt. Det konkluderes med at metoden egner seg for determinering av slitasjeegenskapene til grusmaterialer tiltenkt dette formålet.

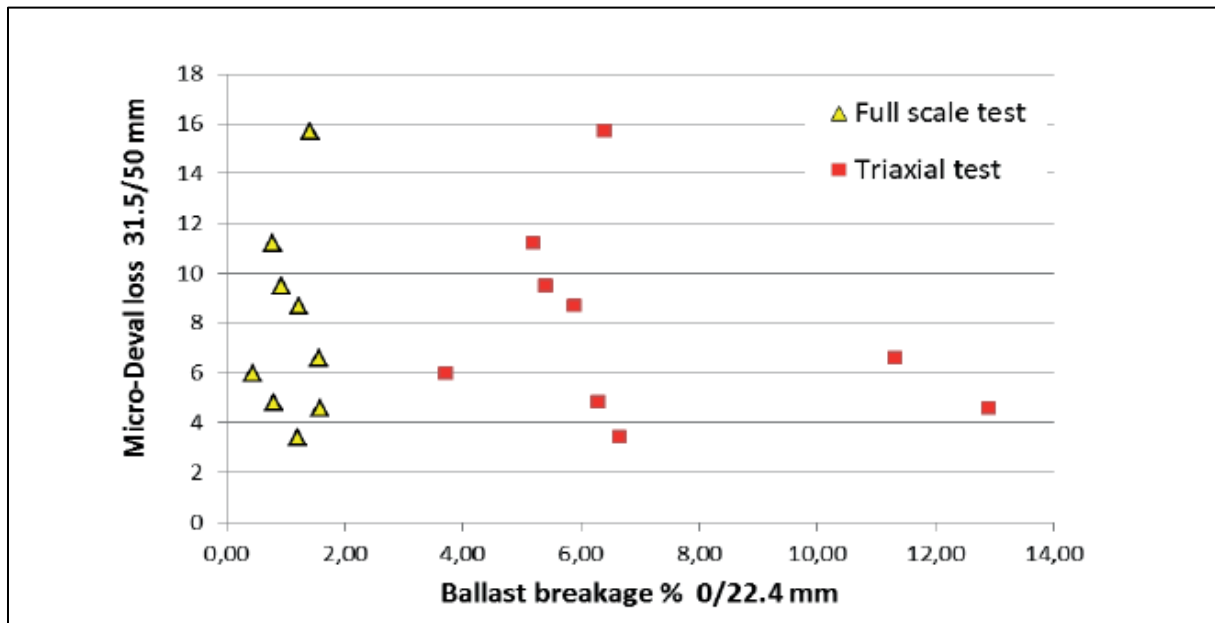
Lang et al. (2007) kom frem til en lignende konklusjon da han sammenlignet ulike laboratorieundersøkelser for tilslagsmaterialer med materialenes observerte ytelse i varmblandet asfalt og i sementbetong. Hele 117 ulike tilslagsmaterialer fra USA og Canada ble benyttet i studien. Det bemerkes her at det er vanskelig å forutsi den endelige materialytelsen til grusmaterialene ettersom bindemidlene ikke er en del av undersøkelsene. Likevel kan micro-Deval-metoden gi en god indikasjon på forventet ytelse, både alene og sett i sammenheng med tester som relativ densitet, Canadisk fryse-tine-test og absorpsjon av vann.

Tanyu et al. (2017) påpeker i sin litteraturstudie noen interessante poenger, som at tilstedeværelsen av vann i trommelen i micro-Deval-undersøkelsen gir en mer realistisk fremstilling av faktiske forhold sammenlignet med LA-metoden. Det er også et meget begrenset antall studier som vurderer sammenhengen mellom materialoppførselen i ubundne bærelag med tilsvarende micro-Deval-verdier.

En av disse ble gjennomført av Rogers i 1998 som sammenlignet feltytelsen til ubundne materialer i bærelag i Ontario, Canada, med tilsvarende micro-Deval-verdier for materialene. Som følge av dette foreslår Rogers at 25 % materialtap som følge av micro-Deval er en passende grenseverdi til å skille mellom gode og dårlige materialer (Tanyu et al., 2017). Tanyu et al. (2017) er kritisk til denne grensen da det i ovennevnte studie er flere materialer som gjennom feltundersøkelsen har blitt klassifisert som gode materialer samtidig som materialtapet i micro-Deval-testen med god margin har overgått 25 %. Denne grensen er derfor ikke basert på en faktisk korrelasjon mellom god og dårlig materialkvalitet observert i felt.

Hossain et al. (2008) viste derimot, ved sammenligning med materialytelse i ubundne bærelag, at micro-Deval skilte mellom gode og dårlige materialer i minst 80 % av tilfellene i studien. 10 forskjellige materialer med størrelse 0,75-4,75 mm fra Virginia, USA, ble undersøkt, og andelen materiale mindre enn 0,75 mm er her avgjørende for micro-Deval-verdien.

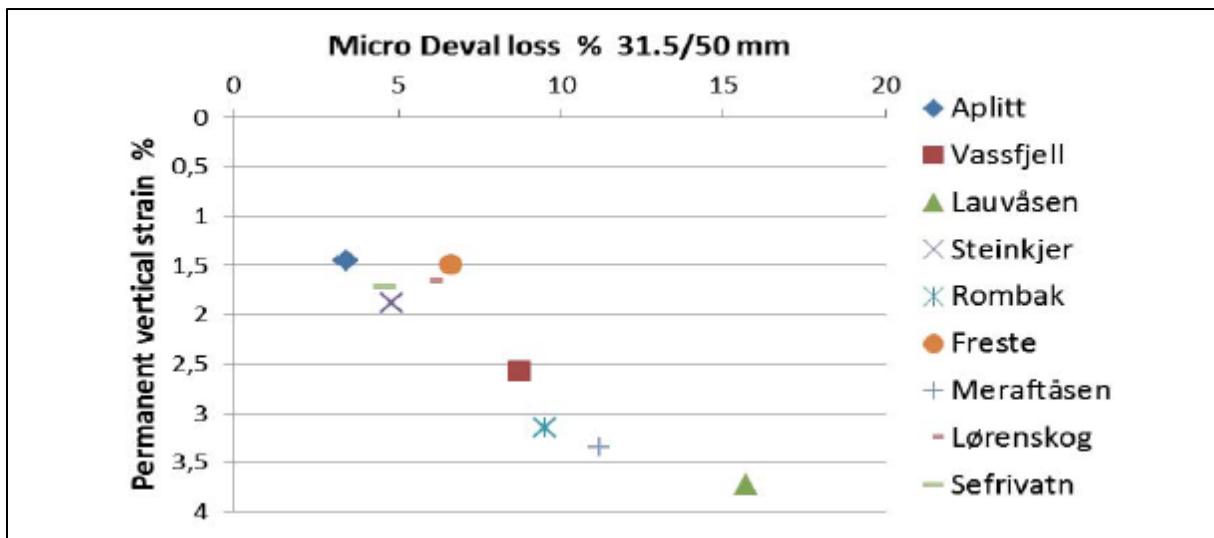
Nålsund (2014) undersøkte også ulike aspekter ved micro-Deval-metoden, både for standardfraksjonen 10-14 mm og ballastfraksjonen 31,5-50 mm. Et av målene var å undersøke hvorvidt micro-Deval korrelerer med faktisk materialoppførsel for ballastfraksjonen. Figur 2.14 viser sammenhengen mellom micro-Deval-verdier og andelen knust materiale som følge av stor treaksialtest og fullskala testmodell for ni ulike ballastmaterialer. Som en kan se av diagrammet gir ingen av disse, begge kjørt med tørt materiale, korrelasjon med resultatene fra micro-Deval.



Figur 2.14 Micro-Deval-verdier i ballastfraksjonen sett i sammenheng med stor treaksialtest og fullskala testmodell. (Nålsund, 2014)

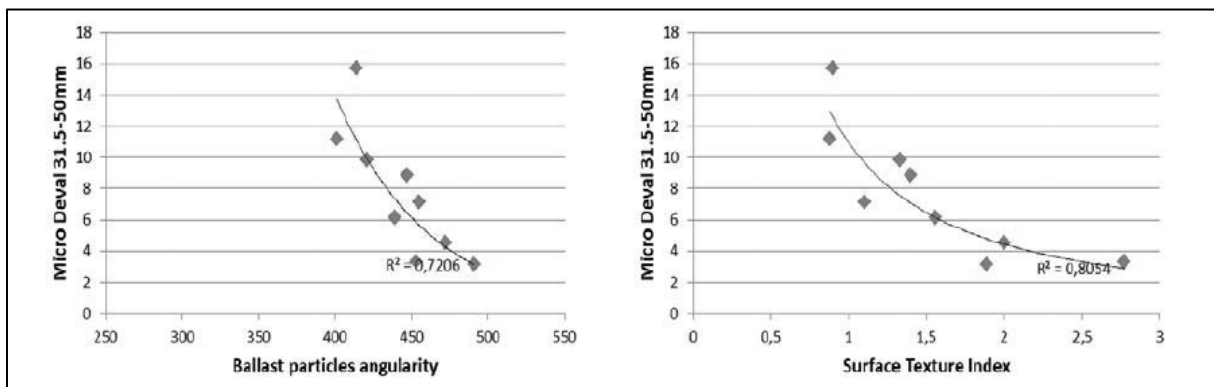
Årsaken til den store forskjellen mellom andelene knust materialene blir tilegnet forskjeller i komprimering av forsøksmaterialene, og ikke forskjeller i i lastsituasjonen da begge testene simulerte en maksimal aksellast på 25 tonn. Komprimeringen av prøvemateriale til treaksialtesten ble gjennomført med en vibrerende vekt på 30 kg i 30 sekunder, som sannsynligvis har ført til forskjeller i degraderingen før selve testingen ble påbegynt. Komprimeringsenergien ved treaksialtesten burde derfor ha blitt redusert, ifølge Nålsund (2014). Hovedpoenget er likevel at en tydelig sammenheng mellom micro-Deval og materialytelse under simulering av reelle forhold ikke er observert i studien.

Nålsund (2014) fant derimot en viss korrelasjon mellom den permanente nedbøyningen som følge av simulert togtrafikk i treaksialtesten og micro-Deval-verdier, som vist i Figur 2.15. Korrelasjonskoeffisienten er her lik 0,83.



Figur 2.15 Permanent vertikal nedbøyning i stor treaksialtest og micro-Deval-verdier. (Nålsund, 2014)

I tillegg konkluderer Nålsund (2014) med at angularitet, overflatetekstur og andelen myke mineraler påvirker micro-Deval-verdiene. Økt angularitet og overflatetekstur gir økt motstand mot abrasjon og dermed lavere verdier, mens andelen myke materialer reduserer slitasjeegenskapene. Spesielt overflateteksturen ser ut til å påvirke abrasjonsmotstanden, med en R^2 -verdi på 0,81, som vist til høyre på Figur 2.16.



Figur 2.16 Micro-Deval-verdier i ballastfraksjonen sett i sammenheng med angularitet (venstre) og overflatetekstur (høyre). (Nålsund, 2014)

Nålsund (2014) påpeker videre at korrelasjonen mellom permanent nedbøyning og micro-Deval kan komme av kornenes overflatetekstur.

Wang et al. (2015) fant at det hovedsakelig er angulariteten som er årsaken til massetapet ved micro-Deval, mens kornformen og overflateteksturen kun i mindre grad er påvirkende parametere. Det ble imidlertid ikke funnet en sammenheng mellom den initielle og den endelige angulariteten.

Rent intuitivt kan en tenke seg at en veldig angulær partikkel har mange «utstikkende» punkter, der disse punktene har lavere bruddgrense enn øvrige deler av partikkelen. En høy grad av rundhet kan tenkes å resultere i korn som i større grad beskyttes av egen form. Samme analogi kan også gjelde overflateteksturen, der partikler med mange ujevnheter i overflaten da også vil ha flere punkter som er

mer utsatt for nedbrytning i en slitasetest. Dette resonnementet avvises imidlertid av Nålsund og Wang, der Nålsund tydelig viser at motsatt effekt er gjeldende; økt grad av angularitet og overflatetekstur gir forbedrede slitasjeegenskaper.

En slags refleksjon over hvilke(n) mekanisme(r) som ligger til grunn for denne korrelasjonen savnes i Nålsunds arbeider og ellers i litteraturen.

Flere studier viser at micro-Deval-testen på en god måte predikerer fremtidig materialytelse til tilslagsmaterialer, også ved sammenligning med andre laboratorietester. En årsak til dette kan være at tilstedeværelsen av vann gir en mer realistisk fremstilling sammenlignet med for eksempel Los Angeles, som testes for tørt materiale (Tanyu et al., 2017). En annen årsak kan være at abrasjon i de fleste tilfeller er en mer relevant nedbrytningsmekaniske enn ren knusing, som videre sannsynliggjør korrelasjon mellom observert materialytelse og laboratorieverdier for micro-Deval.

2.3 SAMMENHENG MELLOM KORNFORM OG MEKANISKE EGENSKAPER

Der sammenhengen mellom de mekaniske egenskapene til tilslagsmaterialer og angularitet og overflatetekstur er påvist og godt beskrevet i litteraturen, er tilsvarende sammenheng med kornformen mindre uttalt. Dette kommer sannsynligvis av at det er en vanskeligere sammenheng å påvise, enten fordi den er mindre gjeldende eller fordi det er vanskeligere å vurdere denne parameteren alene.

I denne delen av litteratursøket vil gjeldende litteratur om sammenhengen mellom kornform og mekaniske egenskaper bli gjennomgått, der delkapitlene er inndelt etter ulike mekaniske tester. Dette er treaksialtest, slagbaserte tester, Los Angeles og micro-Deval.

2.3.1 KORNFORM OG TREAKSIALTEST

Figur 2.2 viser fire prøvematerialer med ulik kornform som ble analysert av Uthus (2007), mens Tabell 2 oppgir flisighets- og stenglighetsindeksen for disse. Materialene kommer av samme forekomst, men har som nevnt forskjeller i kornform, angularitet og overflatetekstur;

1. Kubisk angulære partikler
2. Kubisk avrundede partikler
3. Flisig angulære partikler
4. Flisig avrundede partikler

I tillegg til å evaluere metodene for determinering av kornform ble også kornformens effekt på deformasjonsegenskapene forsøkt funnet gjennom treaksialtesten. Resultatene fra 3D-billedanalyse ble benyttet som sammenligningsgrunnlag. Uthus (2007) fant det imidlertid vanskelig å isolere effekten av kornformen da denne samtidig påvirker tørrdensiteten til prøvematerialet, som videre også påvirker deformasjonsegenskapene. Et kubisk materiale vil oppnå høyere tørrdensitet sammenlignet med et mer flisig materiale gitt at disse blir utsatt for samme komprimeringsenergi. Det utelukkes ikke at det flisige materiale kan oppnå høyere resilientmodulus og gi mer motstand mot permanente deformasjoner gitt samme tørrdensitet som det kubiske materialet, men dette er vanskelig å oppnå uten å signifikant degradere prøven. Det påpekes også at ettersom materialene kommer fra samme forekomst, så er det sannsynlig at eventuelle forskjeller i mekaniske egenskaper vil være små (Uthus, 2007).

Heller ikke Hoff (1999) klarte i sin doktorgradsavhandling å skille kornformen, her representert ved flisighetsindeks, fra andre materialeegenskaper.

Kolisoja (1997) påpeker på sin side at utfordringen ved å beskrive kornformen til et tilslagsmateriale aller best kan beskrives gjennom statistiske verdier som varierer med kornstørrelsen. Likevel har dette

sannsynligvis så liten påvirkning på deformasjonsoppførselen til et materiale at effekten vanskelig lar seg separere fra andre faktorer.

Uthus (2007) fant ved sammenligning av ulike materialer at effekten av kornform raskt blir overstyrt av materialenes iboende egenskaper gjennom mineralogi og mekanisk styrke.

Uthus (2007) gjennomførte også et forsøk med et materiale i den ekstreme enden av skalaen med glatte, sfæriske kuler fra Askøy med diameter fra 14,4 til 15,8 mm, som illustrert i Figur 2.17. Dette er da et materiale som tilbyr et minimum av intern friksjon i kontaktpunktene. I syklisk treaksialforsøk måtte spenningsnivåene reduseres så mye at Uthus setter spørsmålsteget ved hvor relevant forsøket er i forhold til virkelige forhold. Likevel viser hun effektivt at den interne friksjonen mellom kornene har stor innflytelse på deformasjonsegenskapene til et ubundet materiale.

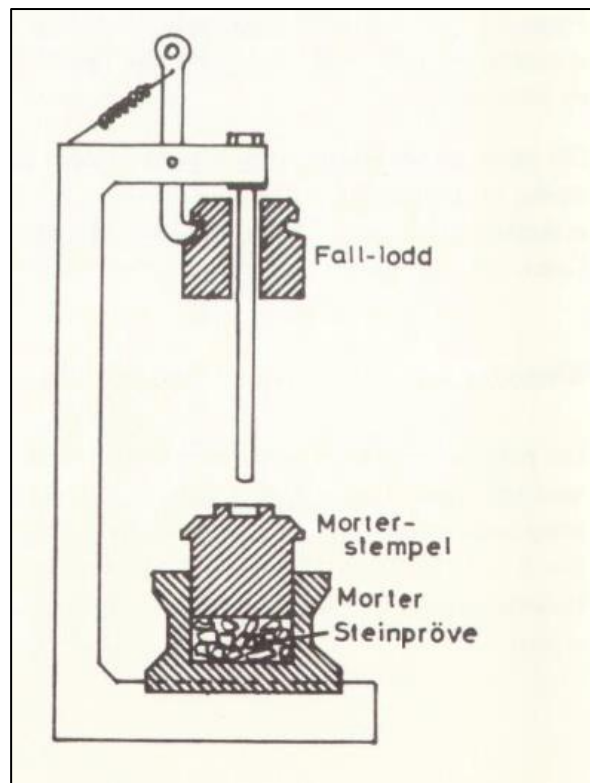


Figur 2.17 Glatte, sfæriske partikler med liten variasjon i diameter. (Uthus, 2007)

2.3.2 KORNFOM OG SLAGBASERTE TESTER

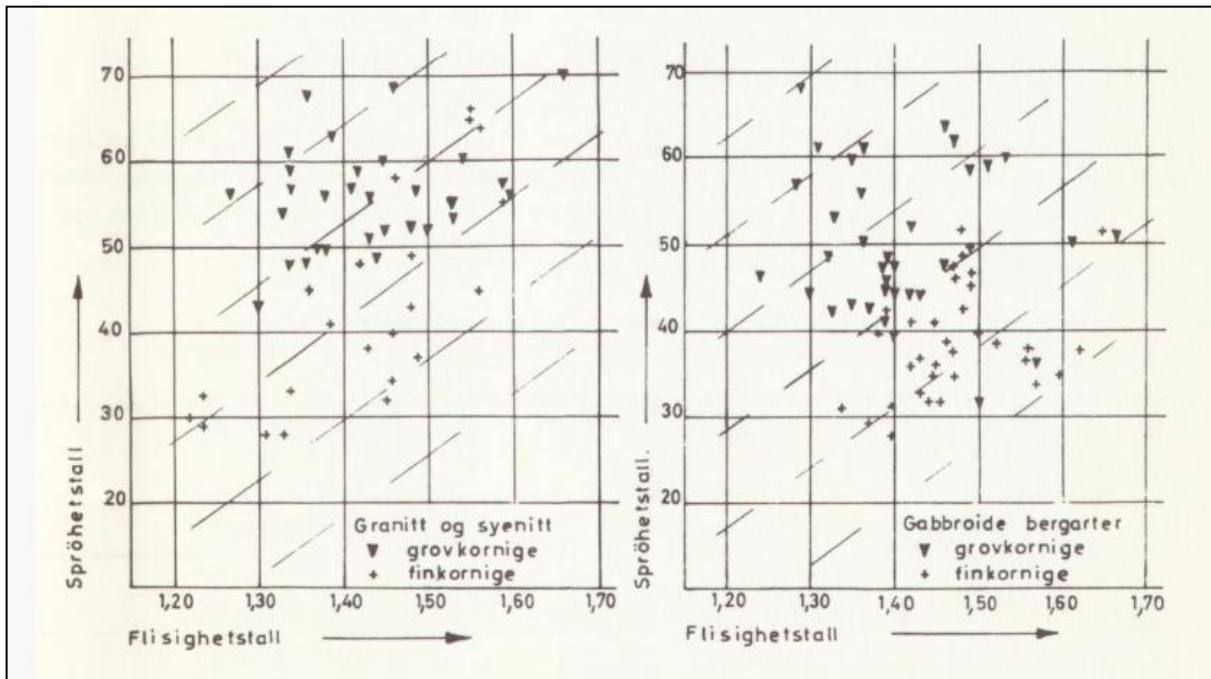
Selmer-Olsen fant allerede mot slutten av 40-tallet at flisigheten kan påvirke de materialtekniske egenskaper (Erichsen, 2013). Det var gjennom den svenske fallprøven og flisighetstallet at Selmer-Olsen (1980) fant en positiv korrelasjon mellom sprøhetstallet og flisighetstallet.

Fallprøven er en metode der en fraksjon av et materiale utsettes for en slagpåkjenning, nærmere bestemt 20 slag av en loddvekt på 14 kg med 25 cm fallhøyde. Typiske prøvefraksjoner ligger rundt 8-16 mm, og Figur 2.18 illustrerer et typisk fallapparat. Vektprosenten materiale som blir nedknust som følge av slagene til under opprinnelig fraksjon betegnes som sprøhetstallet, slik at høyere sprøhetstall tilsier et mindre slagfast materiale (Selmer-Olsen, 1980, Heikkila, 1991).



Figur 2.18 Fallprøveapparat. (Selmer-Olsen, 1980)

Som med LA-testen er spredningen av sprøhetstallet innenfor hver bergart stor, og de finkornige bergartene tenderer mot å være de mest bestandige i fallprøven. Figur 2.19 viser sammenhengen mellom flisigheten og sprøhetstallet, samt at variasjonen i sprøhetstallet er betydelig (Selmer-Olsen, 1980).



Figur 2.19 Sammenheng mellom flisighet og sprøhet for grovkornige og finkornige bergarter. (Selmer-Olsen, 1980)

Selmer-Olsen (1980) viste også at det er god korrelasjon mellom LA-testen og sprøhetstallet når flisighetstallet er rundt 1,45. Denne korrelasjonen blir svakere når flisigheten overstiger 1,50 eller er lavere enn 1,30, som en kan se av Figur 2.20. LA-testen i seg selv er ikke særlig sensitiv for endringer i flisigheten, fastslår Selmer-Olsen (1980).

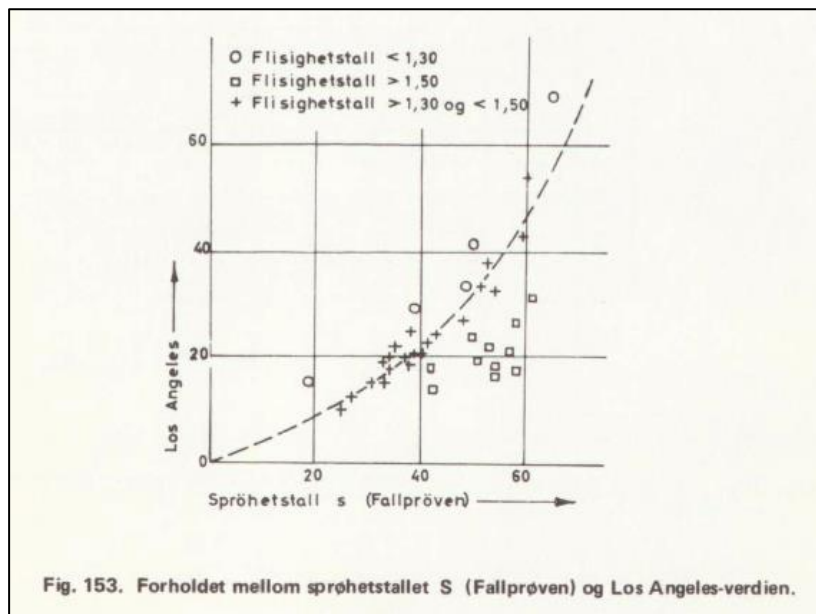


Fig. 153. Forholdet mellom sprøhetstallet S (Fallprøven) og Los Angeles-verdien.

Figur 2.20 Korrelasjon mellom LA og sprøhetstallet for ulike verdier av flisighetstallet. (Selmer-Olsen, 1980)

Stenlid (1996) kommenterer sammenhengen mellom Los Angeles og sprøhetstallet ved at materiale med høyt sprøhetstall vil korrelere dårlig med LA fordi disse materialene ikke blir tilstrekkelig nedknust i fallprøven. Kun det øverste laget i morteren blir knust, hvilket demper kraftoverføringen videre nedover i materialet som vil være relativt upåvirket av testen. Svake materialer i fallprøven kan derfor være enda svakere enn sprøhetstallet skulle tilsi. LA-testen fanger bedre opp disse karakteristikkene ettersom hele materialet roteres og blandes under testen (Stenlid, 1996).

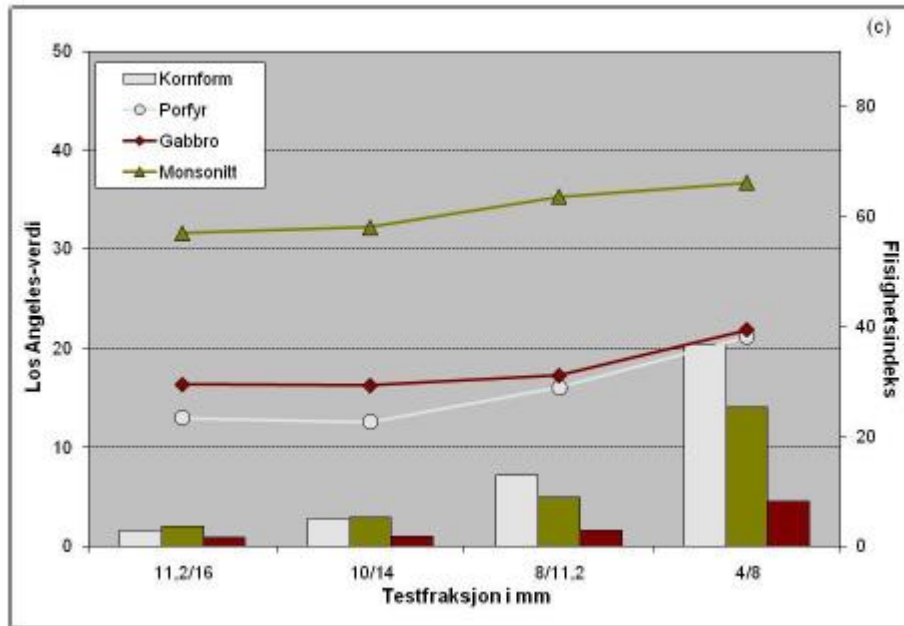
Ramsay et al. (1974) undersøkte sammenhengen mellom de britiske slagtestene «aggregate impact» og «aggregate crushing values» med materialer med stor variasjon av flisighet. Det ble her funnet tilnærmet lineære korrelasjoner med noe ulik helningsgrad for de forskjellige materialene.

Også Heikkila (1991) finner at sprøhetstallet øker med økende flisighet, og det ser ut til å være liten tvil rundt denne sammenhengen.

Heikkila (1991) er derimot blant dem som påpeker at siden kornformen korrelerer med falltesten, og Los Angeles korrelerer med falltesten, så kan en forvente en sammenheng mellom LA-testen og kornform. Dette har imidlertid vist seg vanskeligere å påvise.

2.3.3 KORNFORM OG LOS ANGELES-TESTEN

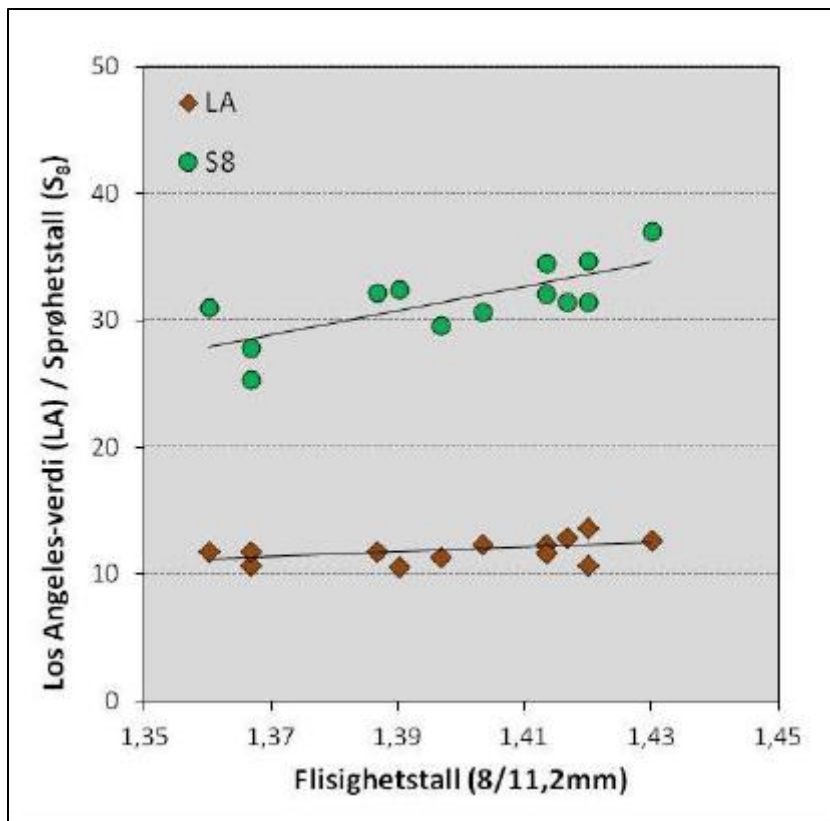
Erichsen et al. (2010) undersøkte tre steinmaterialer som ut ifra Pukkdatabasen har en viss spredning i materialtekniske egenskaper med tanke på slitasje- og knusemotstandsegenskaper. Det er også vektlagt at disse materialene i størst mulig grad skal bestå av homogene bergarter. Porfyr, gabbro og monsonitt er valgt ut, der porfyr er det mest bestandige, gabbro er det mellomliggende og monsonitt besitter de dårligste materialtekniske egenskapene. Hensikten med studien var å undersøke materialtekniske egenskaper på ulike testfraksjoner for tilslagsmaterialer. Trommeltestene kulemåle, Los Angeles og micro-Deval samt kornformtesten flisighetsindeks ble utført for ulike testfraksjoner fra 4-16 mm. Figur 2.4 viser flisighetsindeksen for de tre materialene, der flisigheten tydelig øker for de mindre fraksjonene, spesielt for porfyrmaterialiet. Figur 2.21 viser sammenhengen mellom flisigheten og LA-verdiene for de ulike testfraksjonene, og en ser at LA-verdiene jevnt øker med avtakende kornstørrelse.



Figur 2.21 Sammenheng mellom LA-verdier og flisighet for ulike testfraksjoner. (Erichsen et al., 2010)

Erichsen et al. (2010) utelukker ikke at økningen i LA-verdier kan komme av økt flisighetsindeks, særlig porfyrmateriale virker lovende i så tilfelle, men han påpeker at det her må antas at kulenes størrelse relativt til kornstørrelsen har en betydning. Med det menes at kulestørrelsen, som i LA-testen har en diameter på 40-45 mm og masse tilsvarende 400-445 g, vil være så stor i forhold til minste testfraksjon på 4-8 mm at dette direkte påvirker mengden nedknust materiale, til tross for at det kompenseres med færre kuler i testen.

Det er vist at for enkelte bergarter så er LA-testen mindre følsom for flisigheten enn sprøhetstallet. Erichsen (2013) fant, som vist på Figur 2.22, denne sammenhengen for et sandsteinsmateriale, og den noe mer markante stigningen til sprøhetstallet er en indikasjon på nettopp dette.



Figur 2.22 Flisighetstallets påvirkning på LA-verdien og sprøhetstallet for sandstein. (Erichsen, 2013)

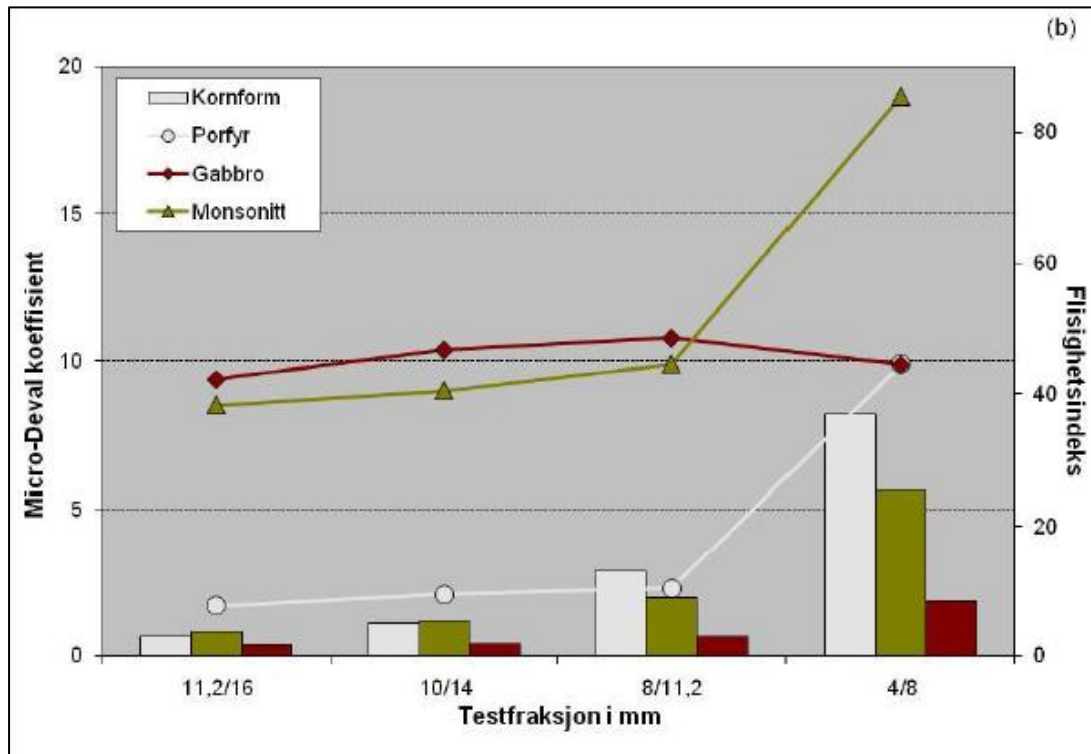
Ramsay et al. (1974) peker på at flisige materialer lett knuses, men da i hovedsak til mindre partikler og ikke til finstoff. Hvis dette medfører riktighet vil ikke LA-verdien alene gi et godt bilde av sammenhengen mellom flisighet og motstand mot knusing, ettersom denne er basert på andelen materiale som er knust ned til mindre enn 1,6 mm. LAX-verdien kan i så måte gi nyttig supplerende informasjon.

Benediktsson and Wigum (2015) tok høyde for nettopp dette og fant i sin masteroppgave at LAX er mer sensitiv for endringer i flisighet enn LA-verdiene. De fant at både LA- og LAX-verdiene øker med økende grad av FI, uavhengig av både bergart (5 ulike er testet) og størrelse på testfraksjon. Denne positive korrelasjonen er imidlertid liten, spesielt for LA-verdiene. Det ble også funnet at bestandige bergarter med lave LA-verdier tenderer mot å være mer sensitive for endringer i kornform (Benediktsson and Wigum, 2015).

Analogien som Heikkila (1991) nevner om at siden det er en sammenheng mellom kornform og sprøhetstallet, og LA korrelerer med fallprøven, så er det logisk å trekke en slutning om at kornformen har en tilsvarende effekt på LA-verdien, er dessverre for enkel. LA-testen ser ut til å være påvirket av flisigheten, men later likevel ikke til å være særlig sensitiv for endringer i denne parameteren.

2.3.4 KORNFOM OG MICRO-DEVAL-TESTEN

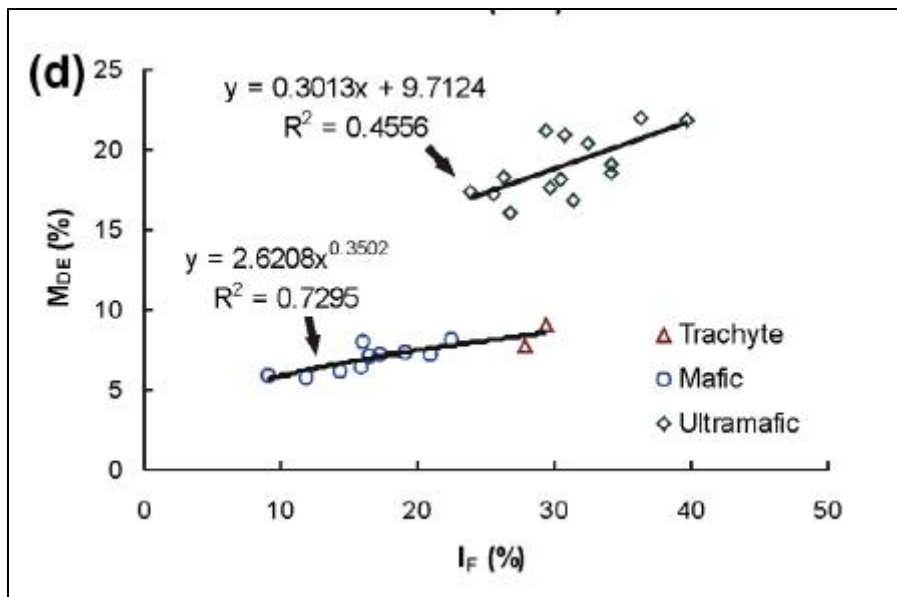
Der Erichsen et al. (2010) ikke kan konkludere flisighetens påvirkning på LA-verdien, er sammenhengen med micro-Deval langt sterkere for de tre bergartene i nevnte studie. Porfyr og monsonitt får en markant økning i micro-Deval-verdien for den minste testfraksjonen, 4-8 mm, og det pekes på en høyere andel flisig materiale for denne fraksjonen som årsak til dette. Figur 2.23 viser sammenhengen



Figur 2.23 Sammenheng mellom micro-Deval-verdier og flisighet for ulike testfraksjoner. (Erichsen et al., 2010)

Ettersom endringen i flisigheten for gabbromaterialet og den tilsvarende micro-Deval-verdien er på samme nivå som resterende verdier for dette materialet, fastslår Erichsen et al. (2010) at det er endringen i kornform som gjør at både monsonitten og porfyren får den kraftige økningen i finstoffproduksjon. Dette tyder på at micro-Deval-verdiene er mer ømfintlige for endringer i kornform enn LA-testen.

Rigopoulos et al. (2013) fant i likhet med Erichsen en positiv korrelasjon mellom FI og micro-Deval-verdiene, som vist i Figur 2.24. Det er her to trender som viser sammenhengen, både for det svakere ultramafiske materialet og for de mer slitesterke materialene trachytt og mafisk bergart.



Figur 2.24 Sammenheng mellom micro-Deval-verdier og flisighetsindeks for tre materialer. (Rigopoulos et al., 2013)

Lang et al. (2007) klarte på sin side ikke å påvise en sammenheng mellom partiklenes form og micro-Deval-verdier for et stort utvalg materialer fra USA og Canada.

Benediktsson and Wigum (2015) fant at micro-Deval-verdien stiger med økende FI for samtlige av de testede bergartene og testfraksjonene. MDx-verdien viser seg, som for LAx, å gi en brattere helning og er dermed mer sensitiv for endringer i flisigheten. Det konkluderes videre med at heller ikke micro-Deval-testen generelt er særlig sensitiv for endringer i FI.

Det er i Benediktsson and Wigum (2015) sin studie benyttet «kunstig» flisige materialer for å få frem en sammenheng mellom flisighet og micro-Deval og LA. I denne oppgaven er ikke materialprøvene manipulert på denne måten, og eventuelle sammenhenger mellom kornform og mekaniske styrkeegenskaper vil derfor etter all sannsynlighet være begrensede. Likevel er det i oppgaven også benyttet stenglighetsindeks som en andre kornformevalueringstest, hvilket ikke er utprøvd av det som kommer frem av den litteraturen som inngår i litteratursøket.

2.4 KNUSINGENS INNVIRKNING PÅ KORNFORM

Knusere egnet til produksjon av tilslagsmaterialer kan deles opp i to kategorier; knusere basert på trykkrefter og knusere basert på dynamiske krefter, også kjent som slagknusere (impact crushers) (Heikkila, 1991). Materialet som er testet i denne oppgaven er knust med en såkalt kjefteknuser, hvilket ligger innenfor kategorien av trykknusere, sammen med gyratorisk knuser og kjegleknuser. Også laboratorieknusingen er gjennomført ved hjelp av en kjefteknuser. Figur 2.25 viser knuseren som er plassert ved Vegvesenets Sentrallaboratorium i Trondheim.



Figur 2.25 Kjevteknuseren ved Sentrallaboratoriet som er benyttet i arbeidet med oppgaven.

Det virker å være en generell oppfatning om at sluttproduktets kornform, som følge av knusing, først og fremst avhenger av metoden benyttet ved knusingen og til en viss grad av materialets iboende egenskaper. Heikkila (1991) sammenlignet i sin litteraturstudie ulike typer knusere og oppsummerer at trykkbaserte knusere tenderer mot å produsere mer flisige og langstrakte materialer enn de dynamiske knuserne. Tyskeren Eibs forklarte i 1977 dette med at steiner som mates i dynamiske knusere vil påføres 8-18 spenninger, mens tilsvarende antall i trykknuser er 1-3 påførte spenninger (Höboda, 1988).

Kapittelet er videre delt opp i to delkapitler der knusemetodens påvirkning på kornformen og bergartens påvirkning på sluttproduktet belyses.

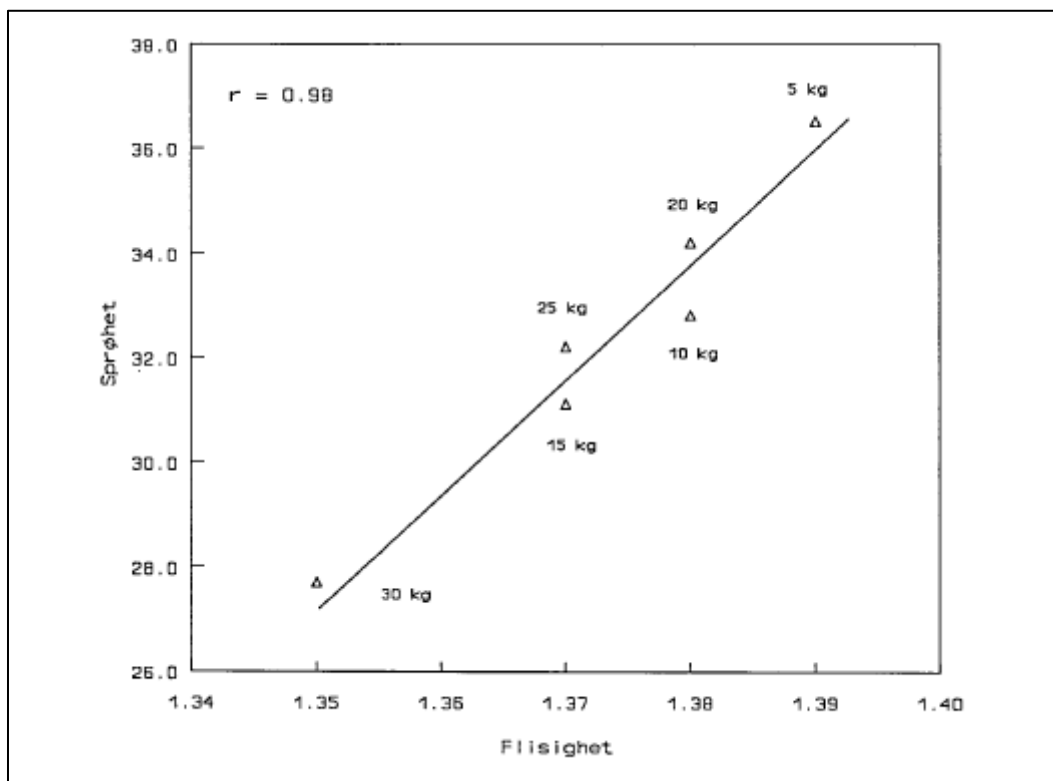
2.4.1 KNUSEMETODENS PÅVIRKNING PÅ SLUTTPRODUKTETS KORNFOM

Heikkila (1991) skriver i sin doktorgradsavhandling at de viktigste innstillingene på en kjevteknuser er avstanden mellom platene, slaglengde og rotasjonshastigheten. Med slaglengden menes forskjellen mellom største og minste avstand mellom platene over en rotasjonssyklus, mens hastigheten til platen er 10-15 cm per sekund. Selmer-Olsen (1980) fastslår at kjevteknusere med småriflete tyggeflater i

forhold til størrelsen på materialet som knuses gir bedre kornform enn tyggere med glatte, slitte eller grovriflete plater.

Ved optimal knusing med en kjefteknuser vil en få mest materiale for de delfraksjonene nærmest knuserinnstillingen, og dette vil også være det minst flisige materialet i sluttproduktet (Selmer-Olsen, 1980, Heikkila, 1991).

Ulvik (1994) benyttet ovennevnte sammenheng som et optimalitetskriterium for knusingen i hennes studie av prøvemengdens påvirkning på knuseforløpet og videre på kornform og sprøhetstallet. Seks ulike prøvemengder av samme bergart fra 5 til 30 kg ble testet med en utløpsåpning på 10 mm ved maksimal stilling. Med en slaglengde på 8 mm var utløpsåpningen i minimum stilling på 2 mm. Ved optimal knusing vil her størst andel materiale produseres innenfor 8-11,2 mm-fraksjonen. Resultatene viste imidlertid at kun den største prøven på 30 kg fikk optimal knusing og videre lavest flisighet og sprøhet, som vist på Figur 2.26.



Figur 2.26 Sprøhetstallet for prøver med ulik prøvemengde i laboratorieknusingen. (Ulvik, 1994)

Figur 2.26 viser ellers en god korrelasjon mellom flisigheten og sprøhetstallet, og hvordan disse øker med synkende prøvemengde. Ulvik (1994) forklarer resultatene med at det alltid vil være noe materiale som renner gjennom uten å bli berørt av tyggeplatene både i starten og i slutten av knusingen, samt at mindre prøvemateriale gir redusert interpartikulær knusing og tid i knusekammeret.

Materiale som renner gjennom uten særlig nedknusing vil også forekomme ved større knuseanlegg, men disse vil likevel ha en jevn mating av materiale over en langt større periode slik at det dårlig knuste materiale kun vil utgjøre en mindre del av sluttproduktet. Ved enten å fjerne dette dårlige materialet eller øke prøvemengden ved laboratorieknusing kan sammenlignbarheten mellom disse to forbedres (Ulvik, 1994). Både Shergold (1959) og Ulvik (1994) påpeker viktigheten av at knuseren først fylles opp og siden etterfylles jevnt.

Også Erichsen (1992) og Heikkila (1991) fant samsvar mellom mengde nedknust materiale innenfor en delfraksjon og de påfølgende fallprøveresultatene. Erichsen (1992) peker på den positive korrelasjonen mellom flisighetstallet og sprøhetstallet som tidligere er observert av Selmer-Olsen (1980) som en forklaring på dette.

Eloranta (1995) konkluderer etter å ha gjennomført 72 tester i et fullskala knuseverk med at kornstørreledistribusjonen til inngangsmaterialet er en av de viktigste parametrene for sluttproduktets kornform. Hvis dette ikke har tilstrekkelig med finstoff som videre gir mye interpartikulær knusing, vil det være vanskelig for andre parametere å kompensere for denne mangelen.

Reduksjonsraten ved en knuseprosess defineres av Heikkila (1991) som den sikteåpningen hvor 50 % av materialet passerer før knusing, dividert på den sikteåpningen hvor 50 % av materialet passerer etter knusing. Han fant at nedgang i reduksjonsraten og det å øke antall knusetrinn forbedrer kvaliteten på sluttproduktet med tanke på kornform.

Shergold (1959) etablerte tidlig at vætet materiale reduserer gjennomgangshastigheten i knuseren og reduserer med det kapasiteten. Likevel vil steinene gjennomgå et større antall laster og dermed få en forbedret kornform.

Flere faktorer kan ut ifra denne litteraturstudien trekkes frem som viktige variabler for knusingens sluttprodukt;

- Knusekammeret bør være fullmatet gjennom prosessen.
- Økt antall knusesteg og lavere reduksjonsrate er positivt.
- Fuktig materiale gir forbedret kornform, men øker knusetiden.
- Velgradert materiale gir bedre knusing sammenlignet med et ensgradert materiale.

I tillegg bør prøvemengden ved laboratorieknusing være tilstrekkelig stor slik at optimal knusing oppnås. Hedwall oppsummerte i 1987 treffende nok at de faktorer som forbedrer sluttresultatets kornform også gir økt knusetid og dermed redusert kapasitet for knuseren (Höbada, 1988).

2.4.2 MATERIALETS PÅVIRKNING PÅ KNUSERESULTATET

Höbada (1988) bemerker at det er få studier som berører hvilken effekt de petrografiske egenskapene har på knusingens sluttprodukt. Det er heller en generell oppfatning om at knuserinnstillingene i større grad påvirker dette fremfor steinenes iboende egenskaper. Shergold (1959) skriver at det først og fremst er forekomsten og hvor denne stammer fra som determinerer tilslaget styrke. Holt fant i 1993 i sin hovedfagsoppgave resultater som støtter opp om dette. Ulike bergarter fikk her tilnærmet like kornfordelingskurver ved knusing med samme utløpsåpning, slik at bergartene i seg selv tilsynelatende ikke påvirket knuseforløpet (Ulvik, 1994). Ulvik (1994) utelukker ikke at ulike bergarter påvirker knuseresultatet, men ettersom det også oppstår variasjoner i knuseforløpet mellom paralleller av samme bergart er dette vanskelig å påvise.

Noen få sammenhenger mellom materialtypen og sluttproduktet ved knusing er likevel funnet. Selmer-Olsen (1980) skriver at det gjerne er de mest skifrige og sprø bergartene, samt de tette og flintaktige som blir mest flisige som følge av knusing. Heikkila (1991) fant på sin side i sitt litteratursøk at homogene finkornede steintyper, og harde steintyper, tenderer mot å gi dårlig formede produkter. Han skriver videre at kunnskapen knyttet til materialets påvirkning på den endelige kornformen som følge av knusing i stor grad er knyttet til empiri og allment aksepterte tommelfingerregler.

Griffith (1921) observerte tidlig at små sprekker i materialet betydelig vil redusere styrken og at bruddplanene først vil oppstå rundt disse om de eksisterer. Stenlid (1996) bemerker at slike mikrosprekker kan komme av sprengningen av fjellet i produksjonsfasen. Heikkila (1991)

argumenterer for at når steinene tenderer mot å få brudd langs de svakere planene vil de på den måten gjenopprette sine iboende styrkeegenskaper til senere knusetrinn. Dette er et godt poeng som kan gjøre seg gjeldende i denne oppgaven ettersom laboratorieknusingen kan forsterke kornene ved å fjerne eventuelle svakheter.

2.5 OPPSUMMERING AV LITTERATURSØK

Av litteratursøket fremgår det at det er en sammenheng mellom kornform og mekaniske egenskaper, men testmetodene Los Angeles og micro-Deval virker kun til en viss grad å være sensitive for endringer i flisighet.

Benediktsson and Wigum (2015) fant tydelige relasjoner mellom flisighetsindeksen og micro-Deval- og LA-verdier, selv om helningene jevnt over holdt en lav stigningsgrad. Det ble i denne masteroppgaven benyttet manipulerte materialer med flisighetsindekser som i enkelte tilfeller varierte fra 0 til 100, og det ville av den grunn vært direkte unøkernt å forvente like tydelige sammenhenger som fremvist her.

Benediktsson and Wigum (2015) fant også at MDx- og LAx-verdiene i større grad ga utslag for endringer i flisighet enn de normale testresultatene. Erichsen (2013) argumenterer for at en ved å inkludere LAx i analyseresultatet forenkler rangeringen av materialer, mens Stenlid (1996) mener denne verdien kan gi en indikasjon på hvilken nedbrytningsmekanisme som er dominerende.

Det er i litteraturen ikke funnet forsøk på å sammenligne stenglighetsindeks med Los Angeles eller micro-Deval.

Det er observert god korrelasjon mellom flisighetsindeks og stenglighetsindeks (Chytla et al., 1995).

Ulvik (1994) viste viktigheten av at prøvemengden ved laboratorieknusing er tilstrekkelig stor, og at dette i motsatt fall kan gi et laboratorieknust materiale med ugunstig kornform. Samtidig argumenterer Heikkila (1991) for at når steinene tenderer mot å få brudd langs sine svakere plan ved knusing, så gjenoppsettes steinenes iboende styrkeegenskaper til senere knusetrinn.

Dette medfører at laboratorieknusing kan ha to effekter som virker motsatt. På den ene siden kan det være for lite prøvematerialet som videre gir ikke-optimal knusing og ugunstig kornform, mens laboratorieknusingen på den andre siden kan fjerne eventuelle mikrosprekker i kornene som gjør at den mekaniske styrken forbedres. Dette kan også virke sammen, såfremt en oppnår optimal laboratorieknusing som videre kan øke kubisiteten til prøvematerialet.

Hvorvidt laboratorieknusingen er optimal eller ikke kan vurderes, samtidig som også flisigheten og stengligheten til den relevante delfraksjonen ved det knuste materialet vil bestemmes. Det er imidlertid ikke vektlagt å vurdere mikrosprekker nærmere.

Knusekammeret bør være fullmatet gjennom knuseprosessen så langt det lar seg gjøre (Shergold, 1959, Ulvik, 1994, Eloranta, 1995).

KAPITTEL 3. METODE

For å belyse problemstillingen er det tatt utgangspunkt i tre materialer (T4, T5 og T8) av samme forekomst som videre er delt opp i tre paralleller (A, B og C). Materialet er knust én gang med en kjefteknuser ved Metso Minerals sitt testsenter i Tampere, Finland, og det er forskjeller i matningsprosessen og kornstørreledistribusjonen på inngangsmaterialet som skiller materialene. Kjefteknuseren er bygget for materialer med størrelse opp til 510 mm, og åpningen var for samtlige materialer innstilt med en spalteåpning på 70 mm for å simulere produksjon av 0/120 mm pukk.

Metodekapittelet presenterer selve testplanen i Kapittel 3.1, avvik fra standarder i Kapittel 3.2 og fremgangsmetode for å oppnå optimal laboratorieknusing i Kapittel 3.3. Videre dreier Kapittel 3.4 og 3.5 seg om bergarten som er testet og forskjeller mellom materialene T4, T5 og T8.

Materialet ble mottatt som et 0-90 mm-materiale, og størrelsen på de ulike prøvene varierer fra 104 til 196 kg. Enkelte av prøvene er derfor splittet én gang etter NS-EN 932-2. Det ble også mottatt 10-16 mm-materiale som ble siktet ut i Finland for samtlige av de ni prøvene, med den hensikt å teste dette for Los Angeles og micro-Deval. Vekten for disse varierer fra 17 til 25 kg.

Det er i etterkant av arbeidet funnet feil ved stavsiktene som er benyttet for å finne flisighetsindeksen. Disse kan opereres maskinelt og ble kjøpt inn i forbindelse med Kortreist stein-prosjektet. Etter å ha mottatt utstyret ble det imidlertid ikke kontrollert for eventuelle produksjonsfeil, -selv etter å ha observert forbausende høy flisighet for de minste delfraksjonene. Dette er i høyeste grad kritikkverdige, da operatøren av laboratorieutstyret selvsagt har et ansvar for å sikre at dette ligger innenfor tillatte avvik og fungerer som tiltenkt. Operatøren av utstyret er i dette tilfelle undertegnede, og avvikene forklares ytterligere i Kapittel 3.2.3.

3.1 TESTPLAN

Tabell 7 nedenfor viser testplanen som er gjennomført, der utgangspunktet er 0-90 mm-materialet. Størrelsen på materialet er angitt i parentes.

Tabell 7 Testplan.

	Førstegangsknust materiale fra Tampere, Finland (0-90 mm)	
	Sikteanalyse	
	Flisighetsindeks (4-100 mm)	
	Stenglighetsindeks (4-100 mm)	
Los Angeles (10-14 mm)		63-90 mm-mat. knuses to ganger (optimal knusing)
Micro-Deval (10-14 mm)		Sikter ut 10- 16 mm-mat.
		Flisighetsindeks (10-16 mm)
		Stenglighetsindeks (10-16 mm)
		Sikter ut 10-14 mm-mat.
		Los Angeles (10-14 mm)
		Micro-Deval (10-14 mm)

Venstre del av tabellen består av materialet som allerede i Finland ble siktet ut fra prøvene.

Ved å se på resultatene fra øvre del i tabellen med kornformsanalyser og venstre del med analyser av mekanisk styrke for det tilsvarende materialet, så bør eventuelle sammenhenger mellom kornform og mekanisk styrke være mulig å avdekke.

Laboratorieknusing av materialer som allerede er analysert gir muligheter for å se på effekten av nettopp laboratorieknusing for dette materialet. Både de mekaniske egenskapene og resultatene fra kornformtestene for både førstegangsknust- og laboratorieknust materiale ligger til grunn for analysen av laboratorieknusingens effekt.

Testplanen er med dette gjennomført ni ganger, én gang per materiale. Dette tilsvarer følgende arbeid:

- 18 Los Angeles-tester
- 18 micro-Deval-tester
- 9 flisighetsindekser for 4-100 mm-materiale
- 9 flisighetsindekser for 10-16 mm-materiale
- 9 stenglighetsindekser for 4-100 mm-materiale
- 9 stenglighetsindekser for 10-16 mm-materiale
- 9 sikteanalyser for 0-90 mm-materiale, med nedre sikt på 1 mm og øvre på 90 mm.
- 9 laboratorieknusinger
- Kontroll av knuseråpning for optimal knusing

Samt et utall sikteoperasjoner med kvadratiske sikt (maskinelt).

3.2 AVVIK FRA GJELDENDE STANDARDER

I det følgende vil avvik fra gjeldende standarder bli beskrevet. Prøvene er generelt ikke vasket og tørket før testing, med unntak av LA og micro-Deval. Dette er et tidsbesparende tiltak og regnes ikke som en signifikant feilkilde da finstoff ikke er i fokus i oppgaven.

3.2.1 NEDDELING AV PRØVER

- Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser presiserer at splitteapparatets spalteåpninger minimum skal ha en vidde på to ganger øvre kornstørrelse av fraksjonen som skal deles (Statens vegvesen, 2016). 0-90 mm-materialet bør derfor splittes på en splitter med spalteåpning på 180 mm. Dette er imidlertid splittet med en spalteåpning på 10 cm, som Figur 3.2 viser. Figur 3.1 viser selve splitteren.



Figur 3.2 Spalteåpning ved splitting av 0-90 mm-materialene.



Figur 3.1 "Storsplitteren" ved Sentrallaboratoriet.

3.2.2 KNUSING

Ingen avvik fra gjeldende beskrivelse i Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser. Materialet er knust i to omganger, først enkeltvis steiner og deretter er knuseren fullmatet.

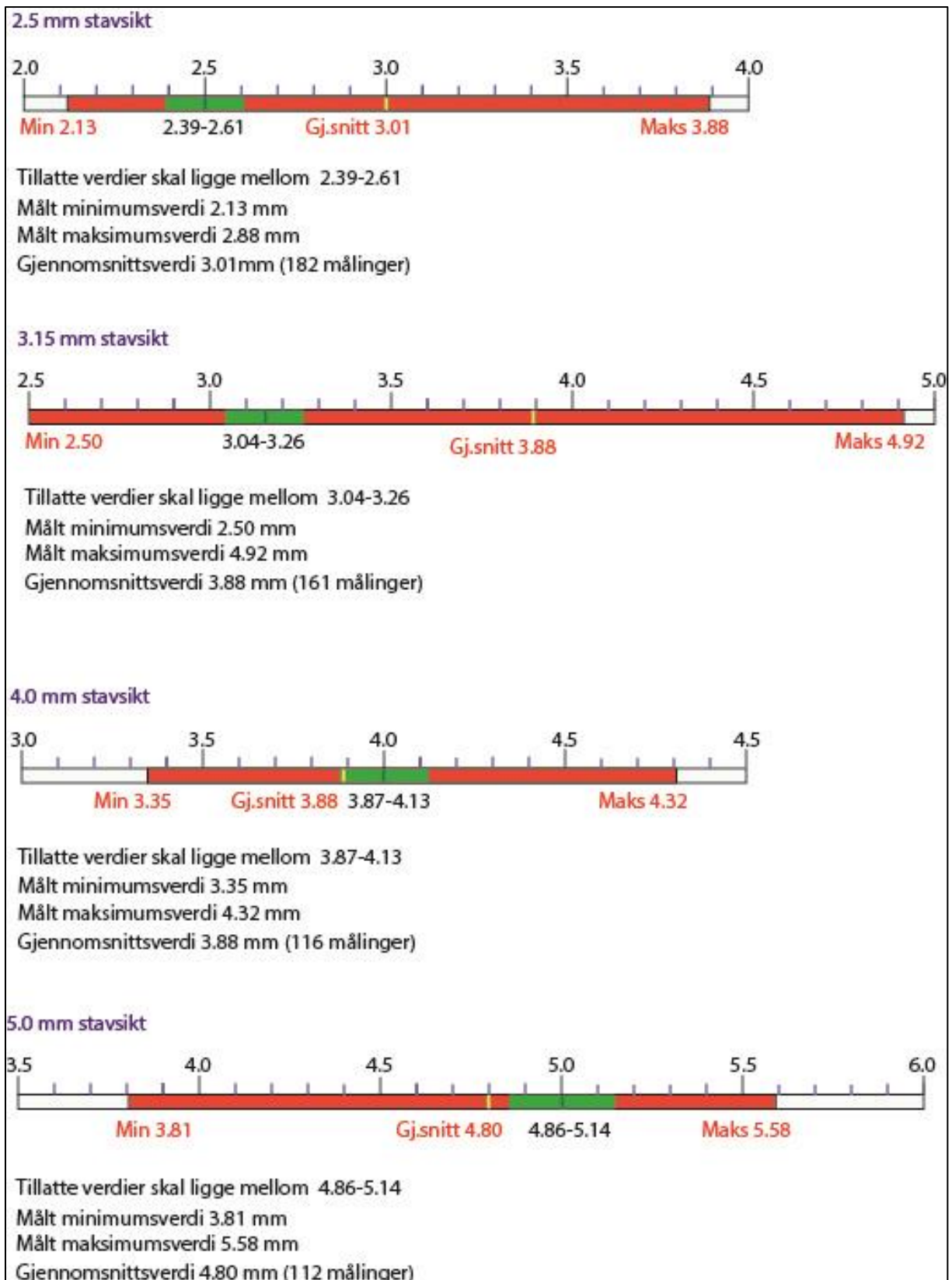
3.2.3 FLISIGHETSINDEKS

- Prøvene er ikke vasket og tørket før testing.
- Som nevnt er det funnet til dels store avvik ved stavsiktene som er benyttet i arbeidet. Tabell 8 er en sammenfatning av de kravene som fremkommer av gjeldende internasjonale standard (ISO 1033-2) hva gjelder toleransekravene til avstanden mellom stavene i stavsikter (ISO, 2013). Disse gjelder for spaltenes fulle lengde.

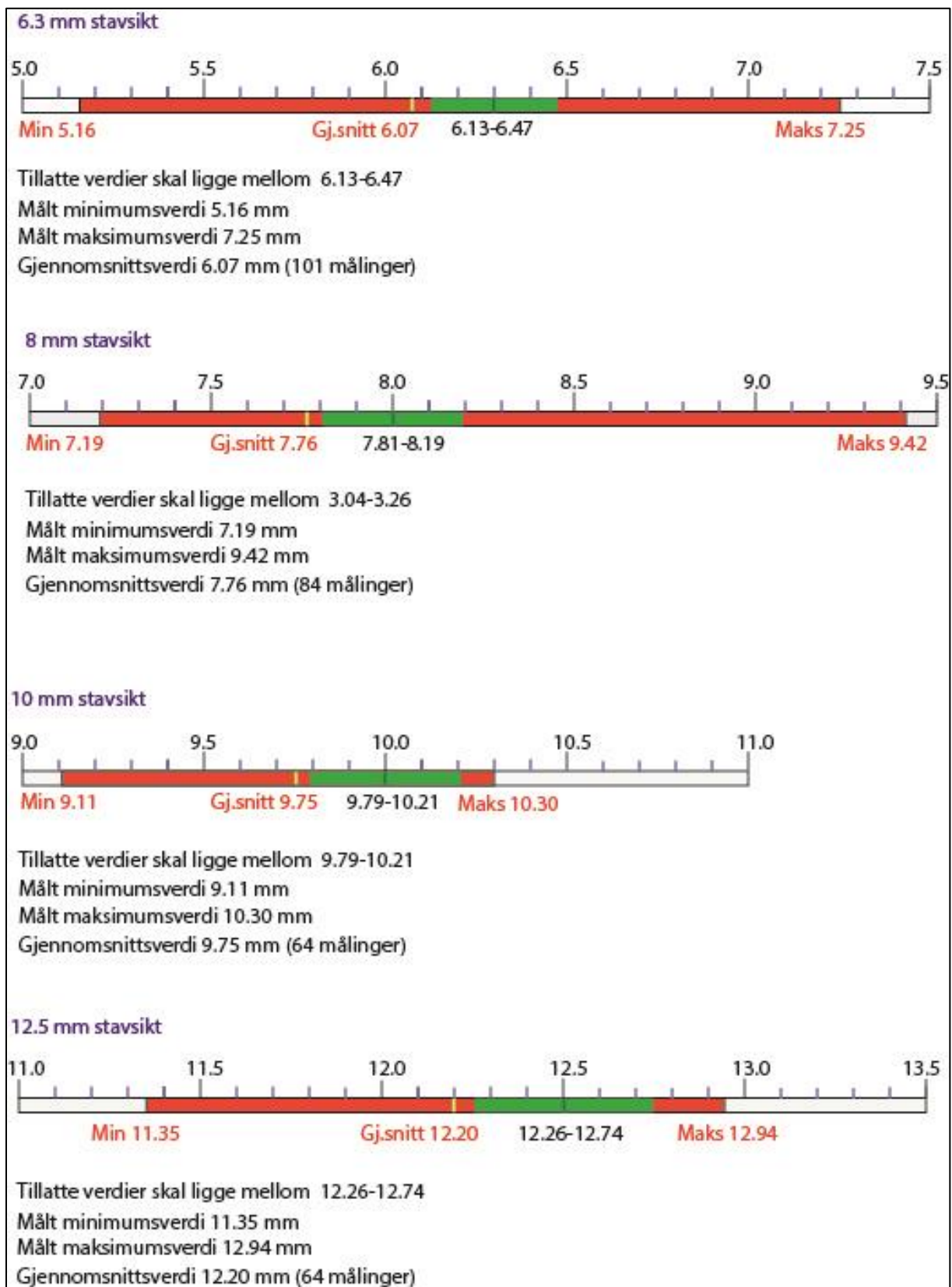
Tabell 8 Toleransegrenser for avstand mellom stavene i stavsikter. Kopiert fra ISO (2013)

Kornstørrelsefraksjon di/Di [mm]	Spaltebredde i stavsikt [mm]	Toleransegrenser for hver side av spalte [mm]
80/100	50	±0,55
63/80	40	±0,45
50/63	31,5	±0,4
40/50	25	±0,35
31,5/40	20	±0,3
25/31,5	16	±0,27
20/25	12,5	±0,24
16/20	10	±0,21
12,5/16	8	±0,19
10/12,5	6,3	±0,17
8/10	5	±0,14
6,3/8	4	±0,13
5/6,3	3,15	±0,11
4/5	2,5	±0,11

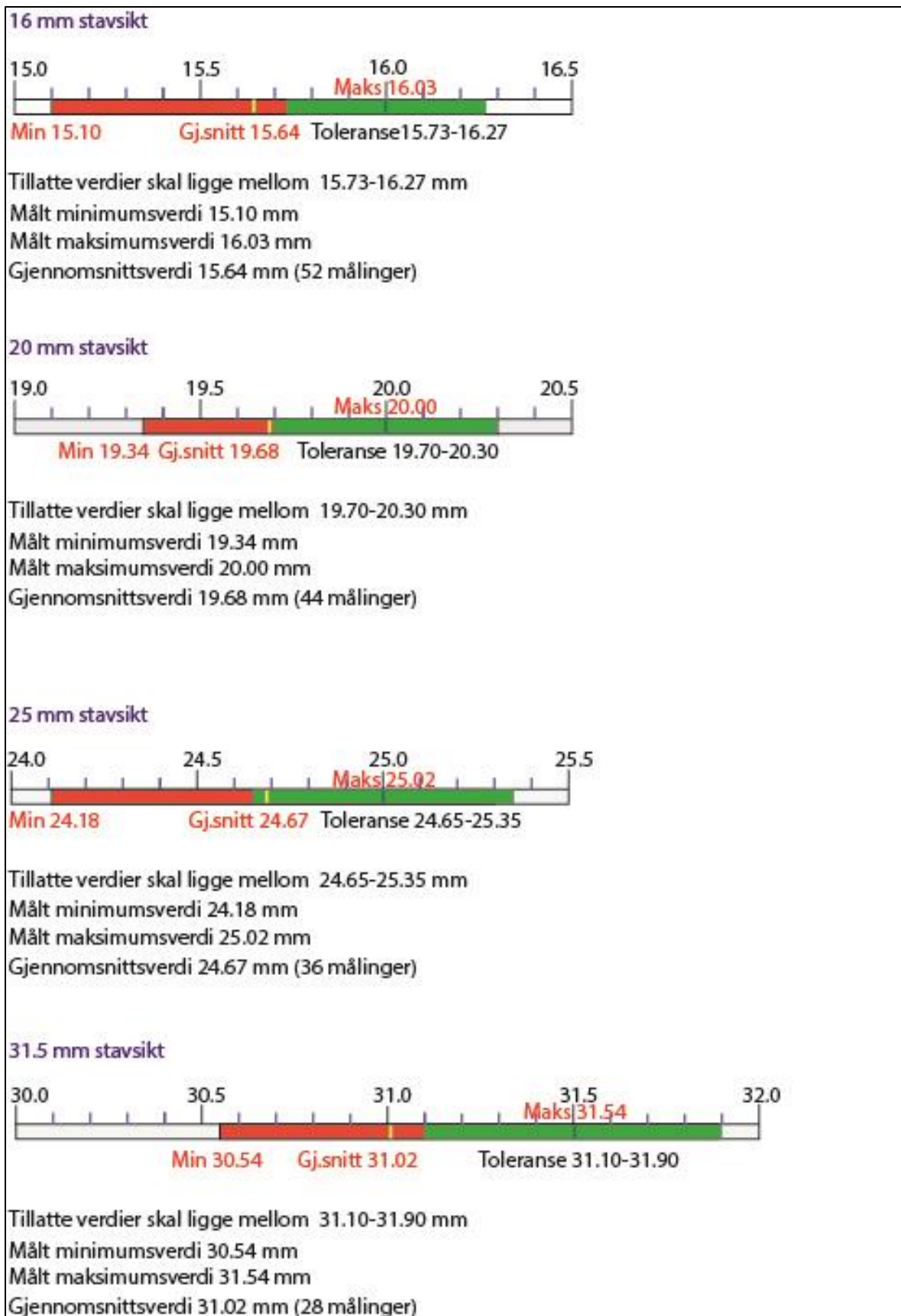
Figur 3.3, Figur 3.4, Figur 3.5 og Figur 3.6 viser målinger av spaltebredden for samtlige stavsikter, gjennomsnittsåpning og maks- og minimumsverdi. Disse er gjennomført av Arnhild Ulvik ved Sentrallaboratoriet i Trondheim. Et skyvelære er benyttet ved målingene. Minimum 20 målinger er gjort per sikt, med langt flere målinger for siktene med mindre åpninger. Målingene viser at samtlige sikter ligger langt utenfor toleransekravene.



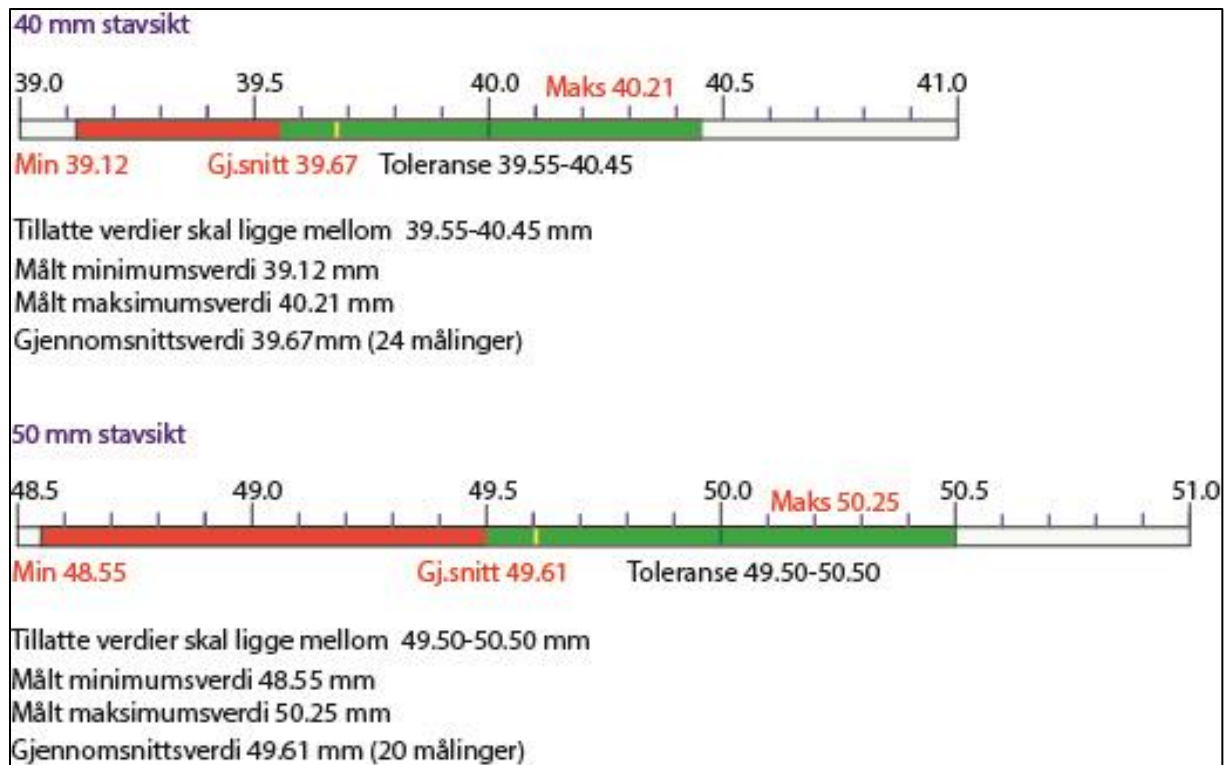
Figur 3.3 Avvik for stavsikter på 2,5 mm, 3,15 mm, 4,0 mm og 5,0 mm. Utarbeidet ved Sentrallaboratoriet.



Figur 3.4 Avvik for stavsiktene på 6,3 mm, 8 mm, 10 mm og 12,5 mm. Utarbeidet ved Sentrallaboratoriet.



Figur 3.5 Avvik for stavsiktene på 16 mm, 20 mm, 25 mm og 31,5 mm. Utarbeidet ved Sentrallaboratoriet.



Figur 3.6 Avvik for stavsiktene på 40 mm og 50 mm. Utarbeidet ved Sentrallaboratoriet.

De aller mest kritiske verdiene er nok funnet for 2,5 mm- og 3,15 mm-siktene, som begge har gjennomsnittlige spaltebredder godt over tillatte maksimale spaltebredde. Største spalteåpning for 2,5 mm-siktet er målt til 3,88 mm, og av 161 målinger var kun 4 av disse i henhold til tillatt avvik. Gjennomsnittsspalteåpning på 3,01 mm tilsvarer 0,51 mm for mye åpning i snitt. For 3,15 mm-sikten var kun 10 av 182 målinger i henhold til tillatt avvik. Med en gjennomsnittsspalteåpning på 3,88 mm, er åpningen i snitt 0,73 mm for stor.

Figur 3.7 viser 3,15 mm-stavsikten og det er her tydelig at stavene står skeivt i forhold til hverandre og at dette er en feilprodusert vare.



Figur 3.7 3,15 mm-stavsikt med store visuelle avvik.

For siktene fra 4 mm spaltebredde og oppover er tendensen en annen. Her er gjennomsnittlig spalteåpning mindre enn tiltenkt og det er sannsynlig at for lite materiale har sluppet gjennom. For stavsiktene på 4 mm, 5 mm, 6,3 mm, 8 mm, 10 mm og 12,5 mm er det målt avvik både større enn øvre toleransegrense og mindre enn nedre toleransegrense. Tendensen er likevel helt tydelig; det er langt flere avvik ved nedre toleranse, slik at stavsiktene jevnt over har for små spalteåpninger. Dette kan en lese av Vedlegg H, hvor målingene er oppsummert i tabellform.

Stavsiktene på 16 mm, 20 mm, 25 mm, 31,5 mm, 40 mm og 50 mm har kun avvik ved nedre toleransegrense, vist ved Figur 3.5 og Figur 3.6. Det er derfor her utvilsomt at for lite materiale slipper gjennom siktene og at flisighetsindeksen som en konsekvens av dette blir for lav i forhold til faktisk flisighet.

Til tross for at stavsiktene ikke er i henhold til standard så er resultatene fra metoden presentert. Av disse kommer det frem at spesielt de to minste delfraksjonene, 4-5 mm og 5-6,3 mm, oppnår en mildt sagt unormalt høy flisighetsindeks som, i kombinasjon med den visuelle muligheten for å observere dette, burde ha vekket mistanke om feil ved utstyret på et tidligere tidspunkt.

Det er videre i oppgaven funnet sammenheng mellom kornformevalueringsmetodene flisighets- og stenglighetsindeks. Denne sammenhengen kan av åpenbare grunner ikke kalles gyldig. Det kan heller ikke sammenhengene mellom flisighet og mekaniske egenskaper som er funnet for det laboratrieknuste materialet, og oppgaven må derfor i større grad lene seg på resultatene som fremkommer gjennom stenglighetsindeksen. Likevel kan flisighetsindeksen ha nytteverdi gjennom å sammenligne denne før og etter laboratrieknusing, da avvikene er de samme i begge tilfellene. En eventuell forbedring i kornform vil kunne anskueliggjøres her.

3.2.4 STENGLIGHETSINDEKS

- Prøven er ikke vasket og tørket før testing.
- Øvre kornstørrelse er 100 mm og ikke 63 mm som gjeldende standard tilsier (Norsk Standard, 2008). Delfraksjonene 63-80 mm og 80-100 mm er lagt til testen.
- For de tre første prøvene som ble gjennomført, ble det benyttet delfraksjoner som angitt i Tabell 145-4 i Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser (Statens vegvesen, 2016). Det ble etter dette besluttet, som et tidsbesparende tiltak, å følge tilsvarende delfraksjoner som benyttes for flisighetsindeksen.

3.2.5 LOS ANGELES

- Prøvene er ikke vasket og tørket etter tromling. Det er kun gjennomført en maskinell tørrsiktning på 1,6 mm i 10 minutter, og dette materialet er siden veid.
- L_{Ax}-verdien, som beregnes utifra gjenværende mengde materiale på nederste sikt i testfraksjonen, er kun funnet for 3 av 9 prøver for førstegangsknust materiale. Dette er ikke en verdi som er en del av gjeldende metode (Norsk Standard, 2010).

3.2.6 MICRO-DEVAL

- MD_x-verdien, som beregnes ut ifra gjenværende mengde materiale på nederste sikt i testfraksjonen er ikke funnet for de ni prøvene fra førstegangsknust materiale. Dette er ikke en verdi som er en del av gjeldende metode (Norsk Standard, 2011).

3.3 LABORATORIEKNUSING

Det er et viktig poeng i oppgaven at laboratorieknusingen skal gi så godt produkt som mulig.

I forkant av nedknusningen ble platene på kjefteknuseren byttet ut og erstattet med nye, hvilket er i tråd med Selmer-Olsen (1980) sin anbefaling om at tyggeflatene bør være småriflete i forhold til størrelsen på materialet som knuses.

Videre ble det gjennomført en analyse av optimal knuseråpning. Erichsen (1992) konkluderte med at utløpsåpningen skal være satt til den avstanden som gir størst andel nedknust materiale innenfor den prøvefraksjonen som skal undersøkes. Dette optimalitetskriteriet er fulgt i oppgaven, og innebærer at optimal knusing oppnås når det meste av materialet ligger innenfor 10-14 mm-fraksjonen.

Det er i Vedlegg C inkludert skjemaer for kontroll av knuseren, både med prøvematerialet Lia og T8C. Prøvematerialet Lia er først benyttet for å finne optimal knuseråpning, men ettersom Lia er en hardere bergart enn hva Nokiamaterialet er, er det viktig å kontrollere at optimal knuseråpning er den samme også for Nokiamaterialet.

Ulvik (1994) fant at mengde nedknust materiale minimum bør være 30 kg. Som en konsekvens er det derfor valgt å knuse rundt 34 kg av hvert materiale for å sikre optimal nedknusing.

Nedknusingen av de ni materialene er gjennomført som beskrevet i Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser (Statens vegvesen, 2016).

3.4 TESTET BERGART

Testmaterialet er en granodioritt fra Nokia i Finland. Det er siden knust til et tilslagsmateriale gjennom ett enkelt knusetrinn ved Metso Minerals sitt testsenter i Tampere. Granodioritt består hovedsaklig av kvarts og feltspat, og er ganske utbredt i fjellkjedestrøk (2017).

3.5 FORSKJELLER MELLOM MATERIALENE T4, T5 OG T8

Prøvematerialet består som tidligere nevnt av tre materialer (T4, T5 og T8) der hvert materiale består av tre paralleller (A, B og C). Samtlige er knust med en kjefteknuser innstilt med en spalteåpning på 70 mm for å simulere produksjon av 0/120 mm pukk.

Tabell 9 viser materialenes tre ulike sett av knuseparametre.

Tabell 9 Knuseparametere for T4, T5 og T8.

Materiale	Materialstørrelse inn til knuser	Matenivå
T4	100/400 mm	Høyt
T5	100/400 mm	Redusert
T8	200/400 mm	Høyt

T4-materialet var i utgangspunktet et velgradert materiale som ble knust med høyt matenivå inn til knuseren for å oppnå god interpartikulær knusing mellom partiklene i knusekammeret.

T5-materialet ble knust med redusert matehastighet, altså at det var mindre materiale i knuseren, og dermed redusert interpartikulær knusing sammenlignet med T4-materialet.

T8-materialet var i utgangspunktet et grovere og mer ensgradert materiale enn T4. Knusingen ble gjennomført med høyt matenivå, men de grovere partiklene gir likevel færre kontaktpunkter mellom steinene og dermed redusert interpartikulær knusing.

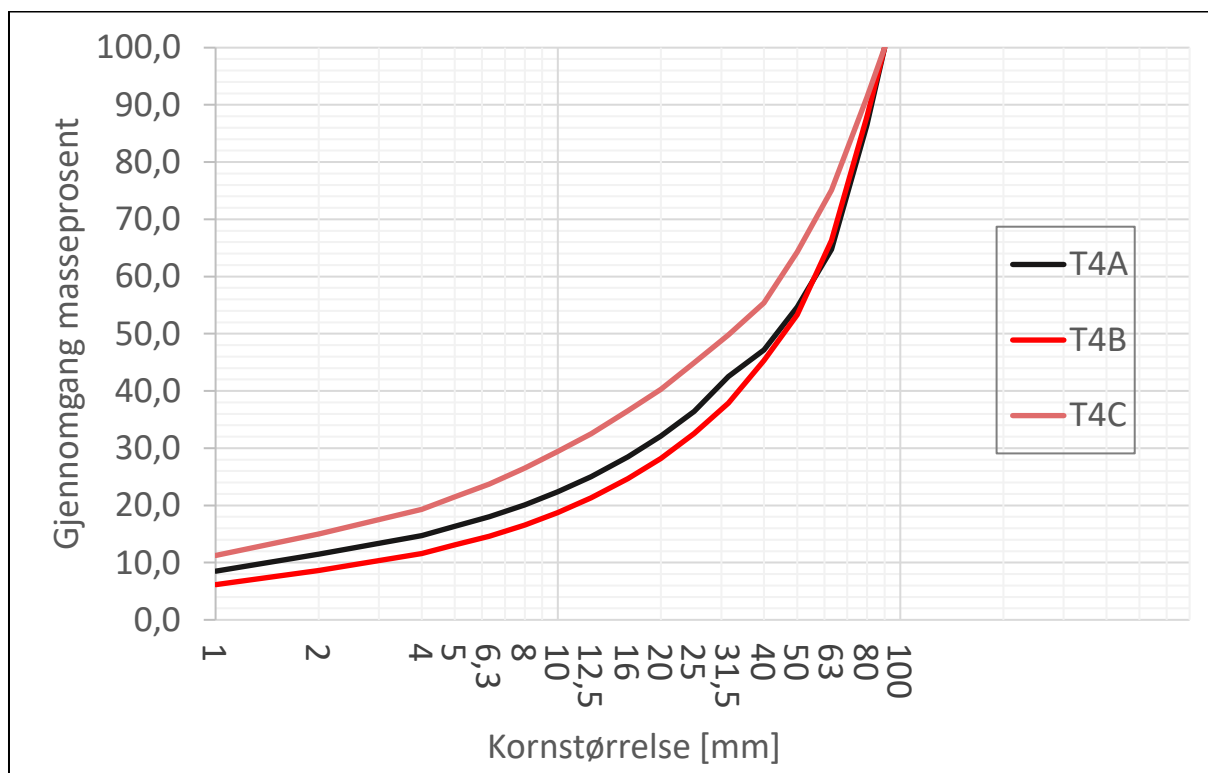
Det er forventet at T4-materialet fikk den beste knusingen av disse tre materialene, og følgelig mest kubisk kornform.

KAPITTEL 4. RESULTATER

Resultatkapittelet er delt opp i fire deler, der de tre første omhandler det førstegangsknuste 0-90 mm-materialet før laboratorieknusing. Materialenes siktekurver fremvises i kap. 4.1, resultater knytta til kornform i kap. 4.2 og kap. 4.3 gir en fremstilling av den ikke-påviste sammenhengen mellom kornform og mekaniske egenskaper for det førstegangsknuste materialet. Til slutt blir effekten av laboratorieknusing med hensyn på både kornform og styrkeegenskaper presentert i Kap. 4.4.

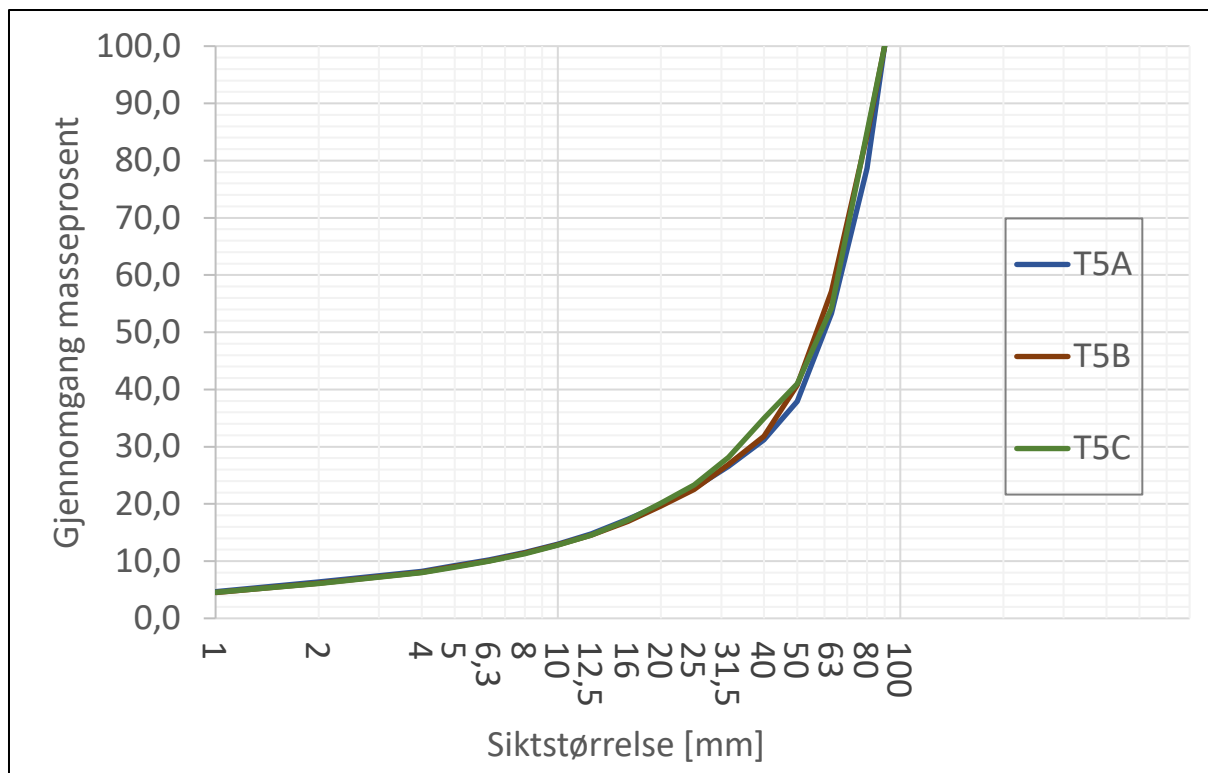
4.1 SIKTEANALYSER

Figur 4.1 viser T4-materialets siktekurver. Det er her en viss spredning mellom kurvene, spesielt for A-parallellen. Det er uvisst hvorvidt materialet er mottatt med denne graderingen eller om forskjellene i kurvene har oppstått som følge av unøyaktighet ved splitting, da både A- og C-parallellen er splittet én gang.



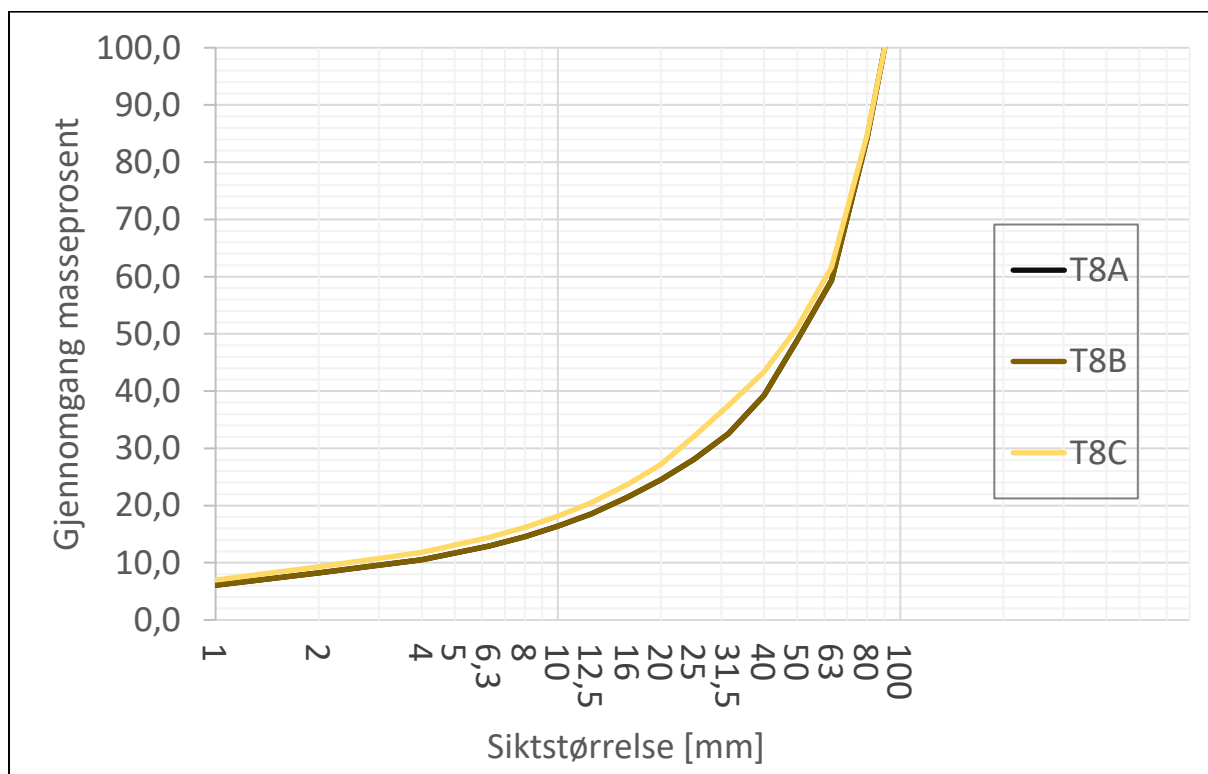
Figur 4.1 Kornfordeling for T4.

Figur 4.2 viser T5-materialets siktekurver. Kornstørrelsedistribusjonen er stort sett den samme for A- B- og C-parallellene.



Figur 4.2 Kornfordeling for T5.

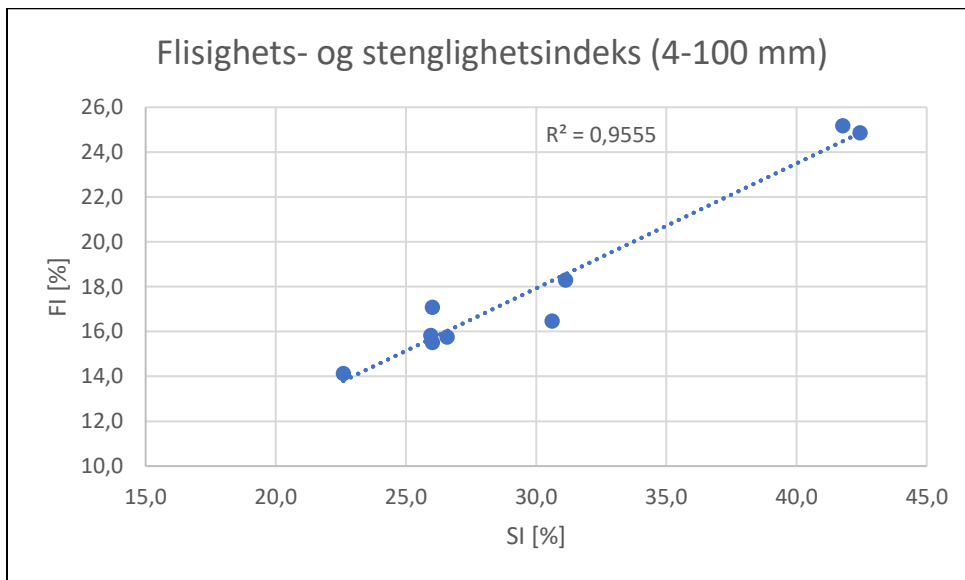
Også for T8-materialet gir parallellene et nokså likt bilde av kornstørrelsedistribusjonen, som vist på Figur 4.3. T5 og T8 ser ut til å være noe mer ensgradert sammenlignet med T4.



Figur 4.3 Kornfordeling for T8.

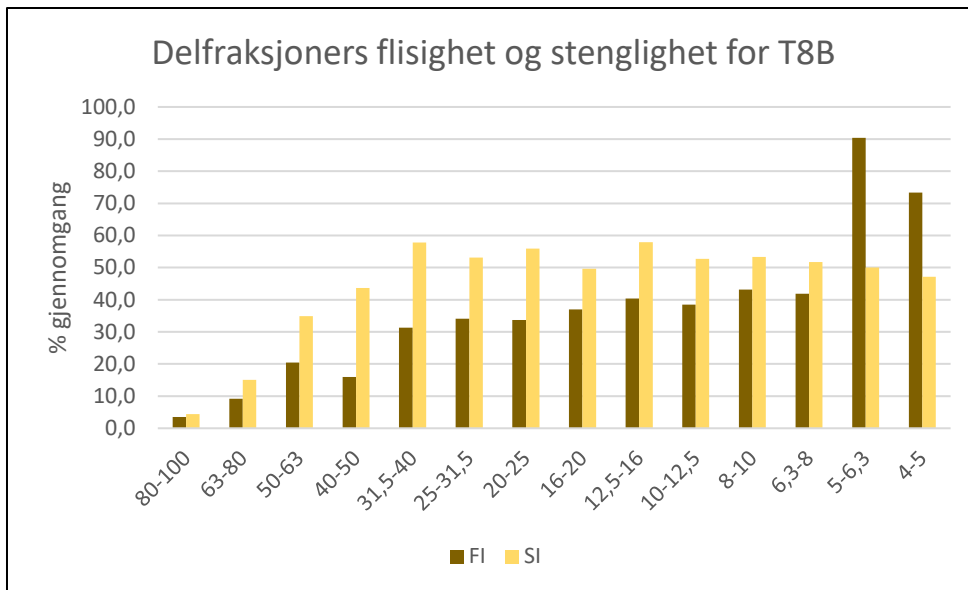
4.2 RESULTATER KNYTTA TIL KORNFOM FOR FØRSTEGANGSKNUST MATERIALE

Ettersom både flisighetsindeksen og stenglighetsindeksen er funnet for hele kurven (4-100 mm) til de ni materialene er det interessant å undersøke hvorvidt disse korrelerer. Figur 4.4 viser de endelige resultatene for prøvene, og at disse korrelerer godt. Korrelasjonskoeffisienten er her på 0,98 ($\sqrt{0,9555} \approx 0,98$).

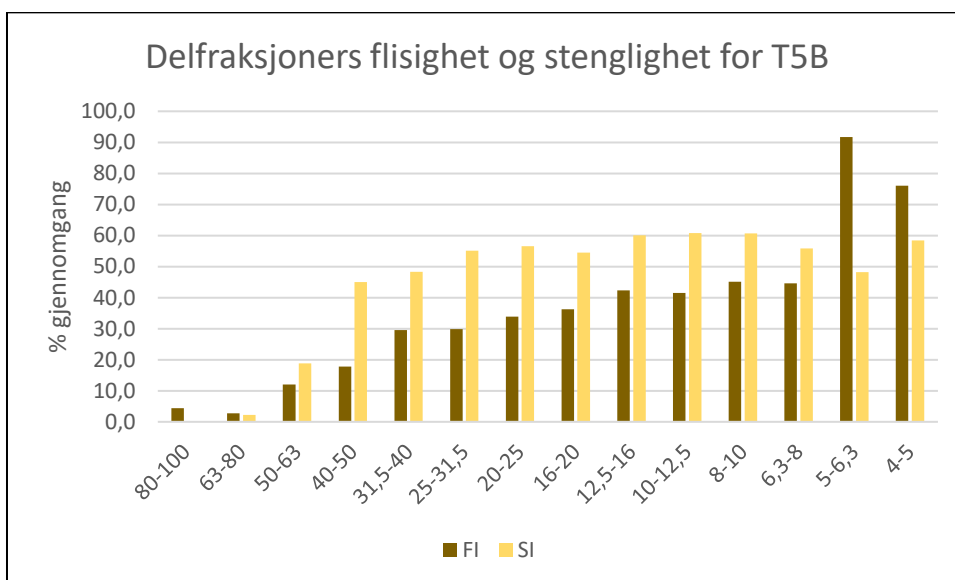


Figur 4.4 Korrelasjon mellom endelig FI og SI (4-100 mm).

Figur 4.5 viser korrelasjonen mellom flisigheten og stengligheten for delfraksjonene til T8B, mens Figur 4.6 viser tilsvarende korrelasjon for T5B. Stengligheten ligger noe over flisigheten for samtlige delfraksjoner med unntak av de to minste; 4-5 mm og 5-6,3 mm. Den skyhøye flisigheten for disse to delfraksjonene kommer som tidligere dokumentert av at gjennomsnittsåpningene på de respektive stavsiktene ligger godt over toleransegrensene for maksimalt avvik.



Figur 4.5 FI og SI for delfraksjonene til T8B.



Figur 4.6 FI og SI for delfraksjonene til T5B.

Hvis en ser bort ifra de to minste delfraksjonene ser det ut til at flisigheten og stengligheten korrelerer godt, med korrelasjonskoeffisienter på 0,90 og 0,94 for henholdsvis T8B og T5B.

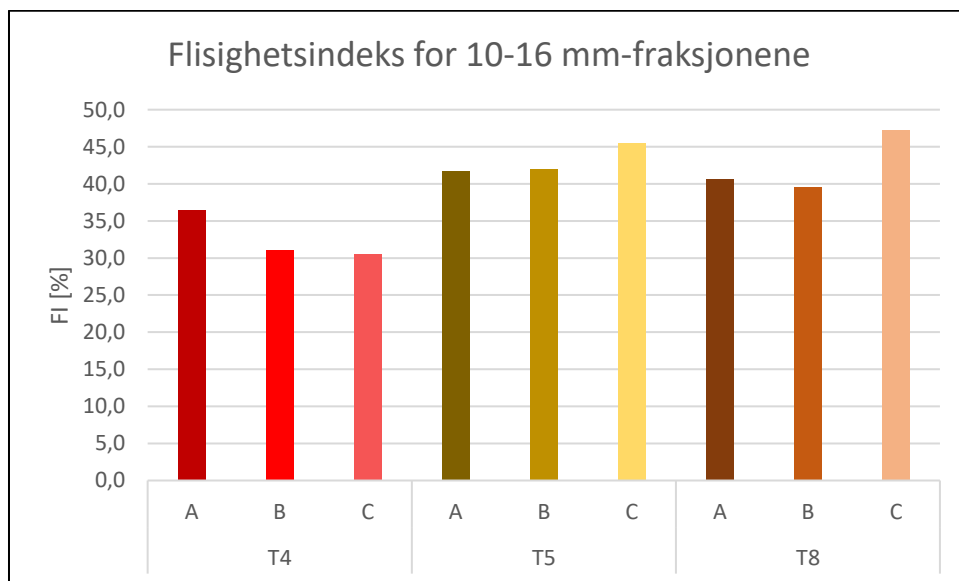
Tilsvarende diagrammer mellom flisighet og stenglighet for de ulike delfraksjonene til T4A, T4B, T5A og T8C er lagt til Vedlegg E. Tabell 10 viser en oversikt over korrelasjonskoeffisientene mellom delfraksjonenes flisighet og stenglighet for de nevnte prøvene.

Tabell 10 Korrelasjon mellom delfraksjonenes FI og SI.

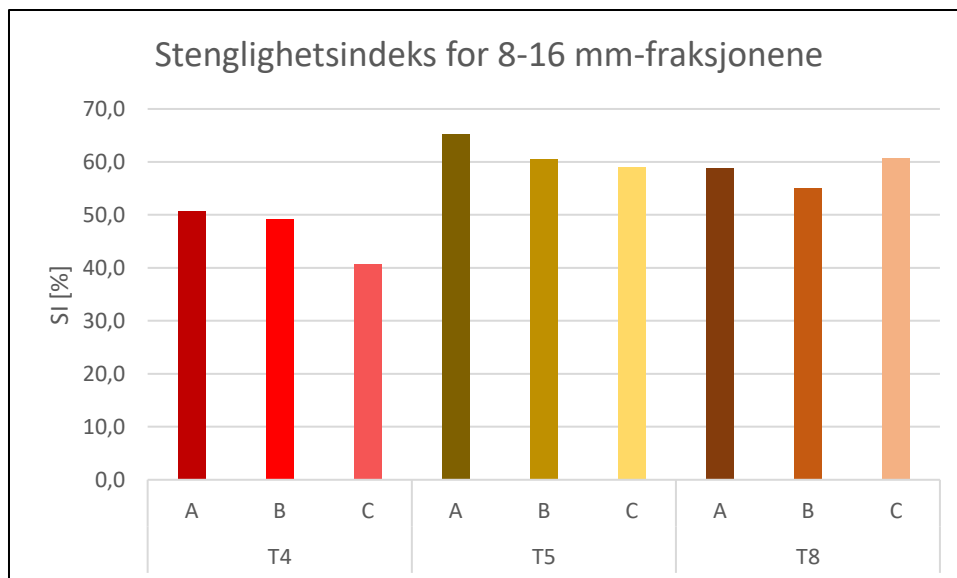
	Korrelasjonskoeffisient	
	4-100 mm	6,3 mm
T4A	0,50	0,85
T4B	0,32	0,70
T5A	0,52	0,89
T5B	0,65	0,94
T8B	0,57	0,90
T8C	0,24	0,70
Gjennomsnitt	0,47	0,83

For senere å kunne sammenligne kornform med mekaniske egenskaper er det hensiktsmessig å fremstille flisighets- og stenglighetsindeksen ved de fraksjoner som Los Angeles og micro-Deval testes for. Figur 4.7 viser flisighetsindeksen for det førstegangsknuste materialet i 10-16 mm-fraksjonen, mens Figur 4.8 viser tilsvarende stenglighetsindeks i 8-16 mm-fraksjonen.

Årsaken til at stenglighetsindeksen er presentert i 8-16 mm-fraksjonen kommer av at tre av materialene ble evaluert med andre delfraksjoner før det ble besluttet å følge samme oppdeling som for flisigheten, som forklart i Kap. 3.2.4.

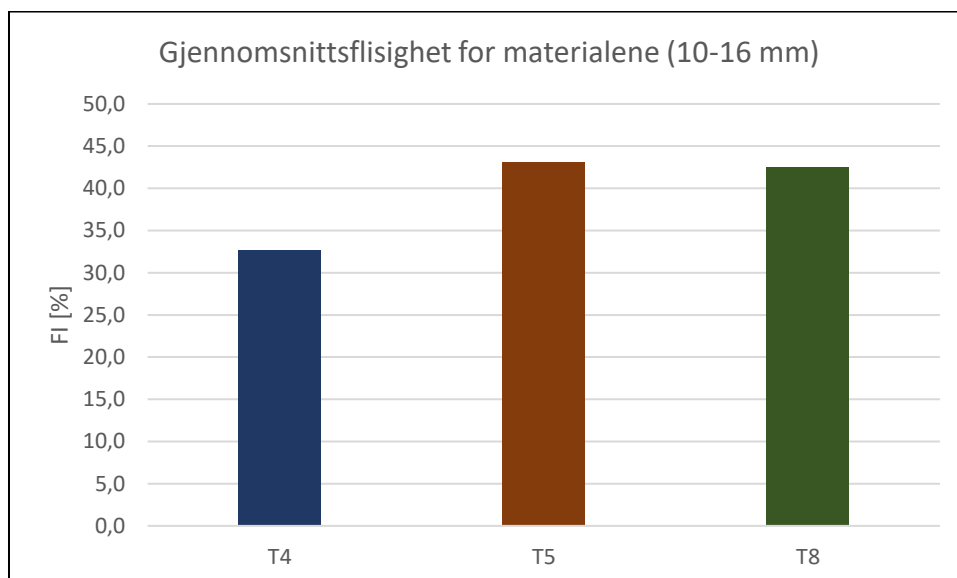


Figur 4.7 FI for 10-16 mm-fraksjonene.

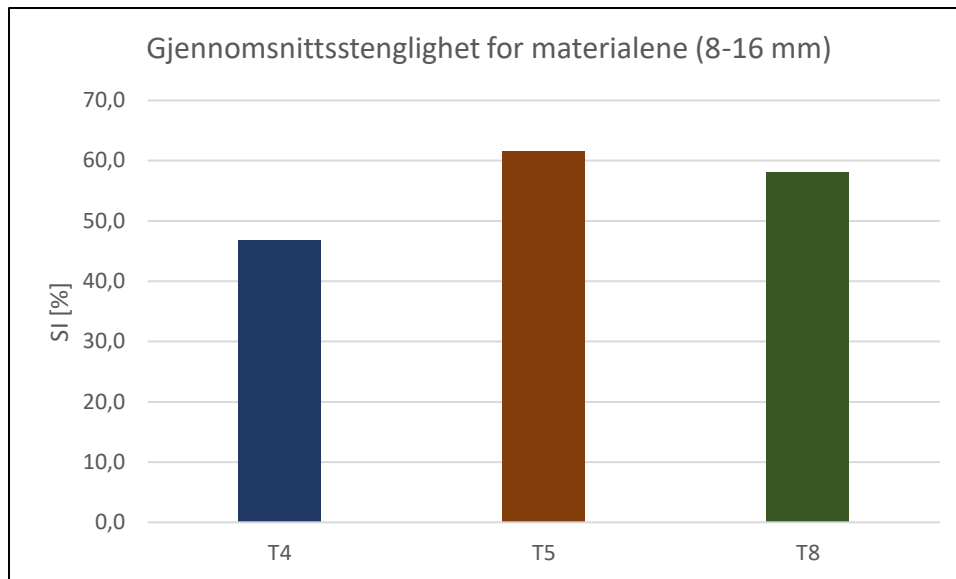


Figur 4.8 SI for 8-16 mm-fraksjonene.

Figur 4.7 og Figur 4.8 viser at både flisigheten og stengligheten generelt er høy, samt at det er en viss variasjon mellom parallellene A, B og C for hvert materiale. Som forventet er det T4-materialet som har den minst ugunstige kornformen. Større variasjon i kornformen mellom de tre materialene var forventet, og Figur 4.9 og Figur 4.10 viser gjennomsnittsverdiene til materialene for henholdsvis flisighet (10-16 mm) og stenglighet (8-16 mm).



Figur 4.9 Gjennomsnittlig FI for materialene T4, T5 og T8 (10-16 mm).



Figur 4.10 Gjennomsnittlig SI for materialene T4, T5 og T8 (8-16 mm).

Tabell 18 gir en oversikt over standardavviket til materialene for begge kornformtestene.

Tabell 11 Standardavviket for gjennomsnittet av FI (10-16 mm og SI (8-16 mm).

	Standardavvik	
	FI	SI
T4	3,27	5,44
T5	2,12	3,23
T8	4,12	2,83

Det er videre gjennomført t-tester for å undersøke hvorvidt materialenes (T4, T5 og T8) flisighet og stenglighet er signifikant forskjellige. Signifikansnivå er satt til 0,05, og nullhypotesen tilsier at materialene ikke er signifikant forskjellige. Ved P-verdier under 0,05 forkastes nullhypotesen og materialenes flisighet og stenglighet er forskjellige. Videre er det benyttet tosidig fordeling med ulik varians.

Tabell 12 T-tester mellom materialene T4, T5 og T8 for FI og SI.

	P-verdier			
	FI	<0,05?	SI	<0,05?
T4 og T5	0,014	ok	0,024	ok
T4 og T8	0,034	ok	0,049	ok
T5 og T8	0,833	ikke ok	0,252	ikke ok

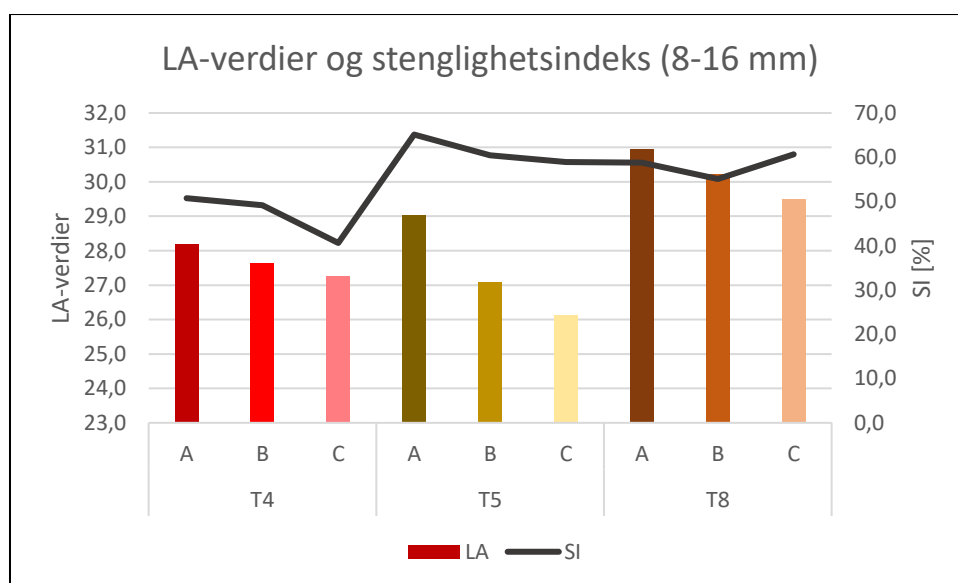
Tabell 12 viser store forskjeller hva materialenes likhet angår. T5 og T8 har høye P-verdier og er følgelig ikke signifikant forskjellige, hvilket stemmer godt overrens med Figur 4.7 og Figur 4.8. Det

ser derimot ut til at T4-materialet er signifikant forskjellig fra T5 og T8 både for flisigheten og stengligheten.

4.3 KORNFORM OG STYRKEEGENSKAPER FOR FØRSTEGANGSKNUST MATERIALE

Det er gjort et forsøk på å finne en sammenheng mellom kornform, representert ved flisighetsindeks og stenglighetsindeks, og mekanisk styrke, representert ved Los Angeles og micro-Deval. De testede materialene ble valgt ut som potensielle ytterpunkter hva kornformen angår, men dette har som nevnt vist seg å ikke stemme for delfraksjonene som ligger rundt 10-14 mm i størrelse.

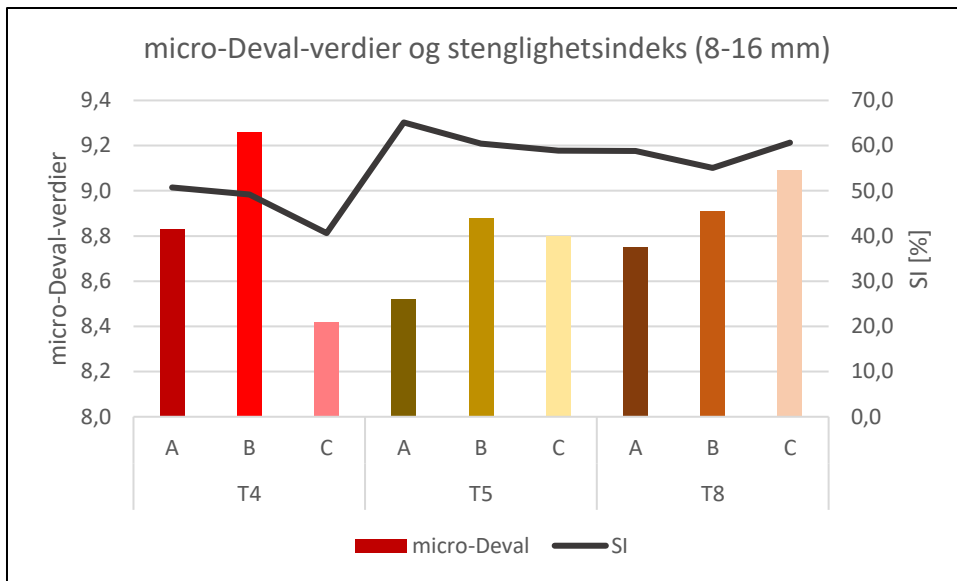
Figur 4.11 viser LA-verdiene sammen med stenglighetsindeksen for de ni prøvene.



Figur 4.11 LA-verdier og SI (8-16 mm).

Som en ser av Figur 4.11 er det en viss variasjon i LA-verdi mellom A, B og C-parallellene, og T8-materialet virker å ha dårligst motstand mot nedknusing.

Figur 4.12 viser micro-Deval-verdiene sammen med stenglighetsindeksen.



Figur 4.12 Micro-Deval-verdier og SI (8-16 mm).

Det er ingen tegn til at kornformen korrelerer med de mekaniske testene i tilfellene som fremvises i Figur 4.11 og Figur 4.12. Dette forholdet virker i det hele tatt å være preget av tilfeldigheter, hvilket kan tyde på at langt flere tester burde vært gjennomført.

Ytterligere dokumentasjon av de ikke-eksisterende sammenhengene mellom flisighetsindeks og mekaniske styrkeegenskaper er å finne i Vedlegg F.

Det er også gjennomført t-tester for å undersøke hvorvidt LA- og micro-Deval-verdiene mellom materialene er signifikant forskjellige. Signifikansnivået er satt til 0,05, og nullhypotesen tilsier at materialene ikke er signifikant forskjellig med tanke på styrkeegenskaper. Ved P-verdier under 0,05 forkastes nullhypotesen. Det er videre benyttet tosidig fordeling med ulik varians.

Tabell 13 T-tester mellom materialene T4, T5 og T8 mtp. LA- og micro-Deval-verdier.

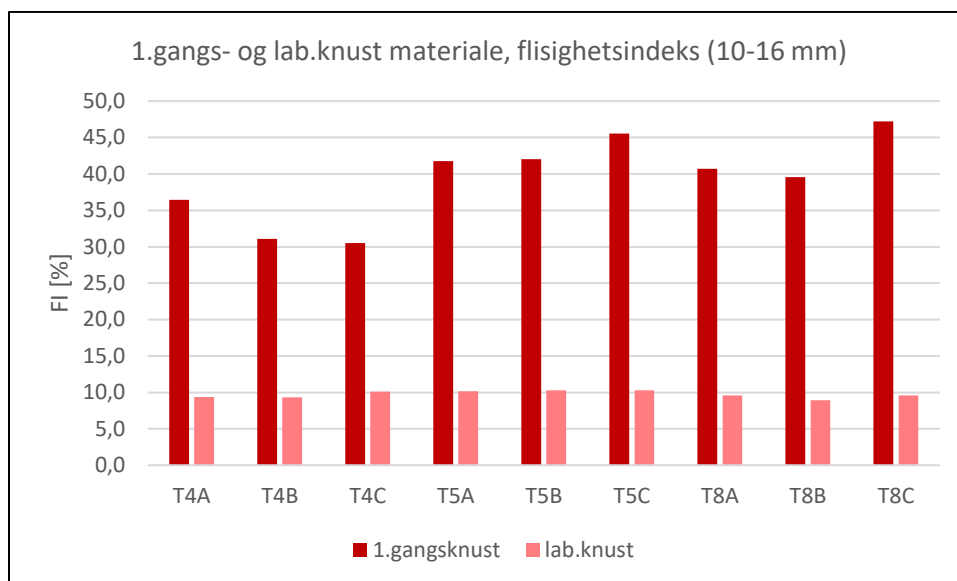
	P-verdier			
	LA	<0,05?	micro-Deval	<0,05?
T4 og T5	0,776	ikke ok	0,725	ikke ok
T4 og T8	0,011	ok	0,782	ikke ok
T5 og T8	0,061	ikke ok	0,281	ikke ok

Av Tabell 13 kan en lese at t-testene bekrefter nullhypotesen i fem av seks tilfeller. Det er kun LA-resultatene for T4 og T8 som er signifikant forskjellige. For resterende materialer er det ikke vist at disse er signifikant forskjellige med tanke på slitasje- og knusemotstand.

4.4 EFFEKT AV LABORATORIEKNUSING

Langt mer tydelige resultater kan observeres når det kommer til laboratorieknusingens effekt på både kornform og mekaniske egenskaper. Laboratorieknusing øker styrken og forbedrer kornformen til samtlige av de ni prøvene som er testet.

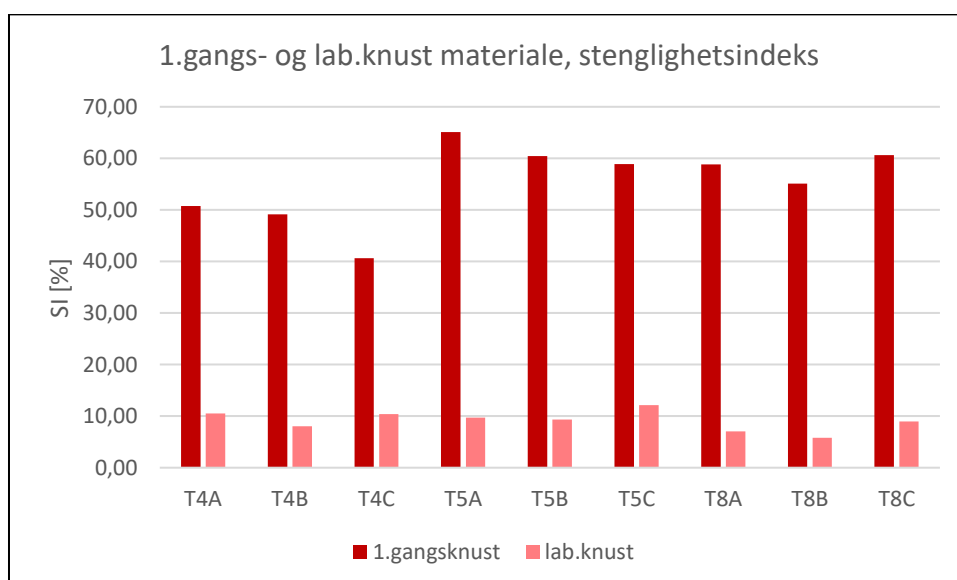
Figur 4.13 sammenligner flisighetsindeksen for det førstegangsknuste og laboratorieknuste materialet for 10-16 mm-fraksjonen.



Figur 4.13 FI (10-16 mm) for førstegangsknust og lab.knust materiale.

Kornformforbedringen som følge av de to ekstra knusetrinnene er utvetydig, og den gjennomsnittlige nedgangen i flisighetsindeks er på hele 29,7 prosentpoeng, fra 39,4 % til 9,7 %.

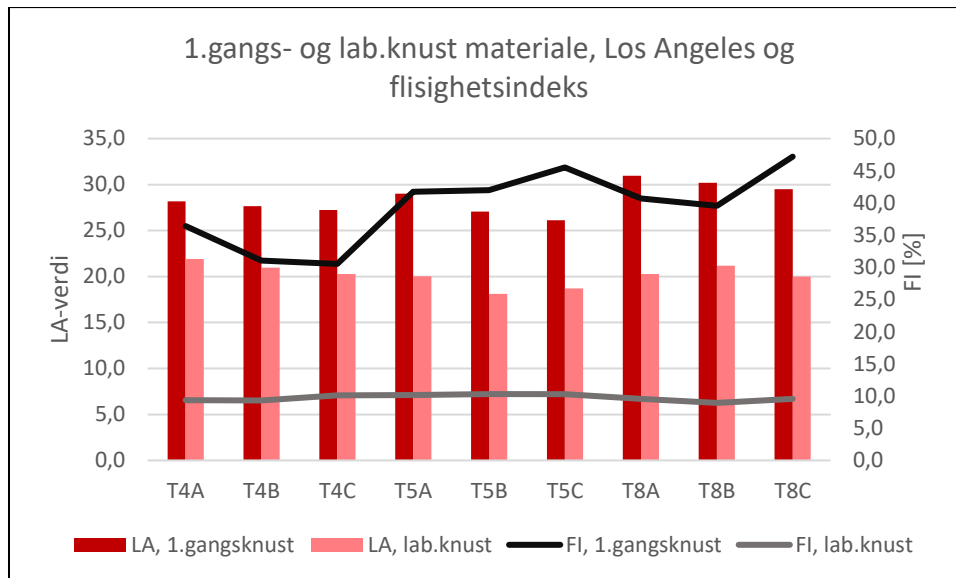
Figur 4.14 sammenligner stenglighetsindeksen for førstegangsknust materiale (8-16 mm) og laboratorieknust materiale (10-16 mm).



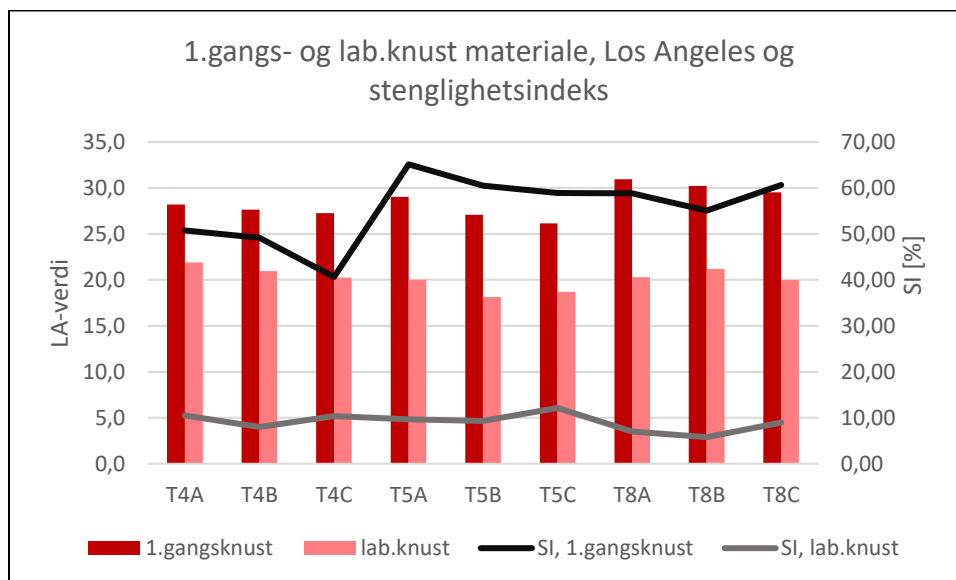
Figur 4.14 SI for førstegangsknust (8-16 mm) og lab.knust (10-16 mm) materiale.

Også her snakker diagrammet for seg selv. Den gjennomsnittlige nedgangen i stenglighet er her på hele 46,4 prosentpoeng, fra 55,5 % til 9,1 %. Dette tilsvarer en reduksjon på 83,6 %.

Figur 4.15 og Figur 4.16 viser LA-verdiene for førstegangsknust og laboratorieknust materiale sammen med henholdsvis flisigheten og stengligheten.



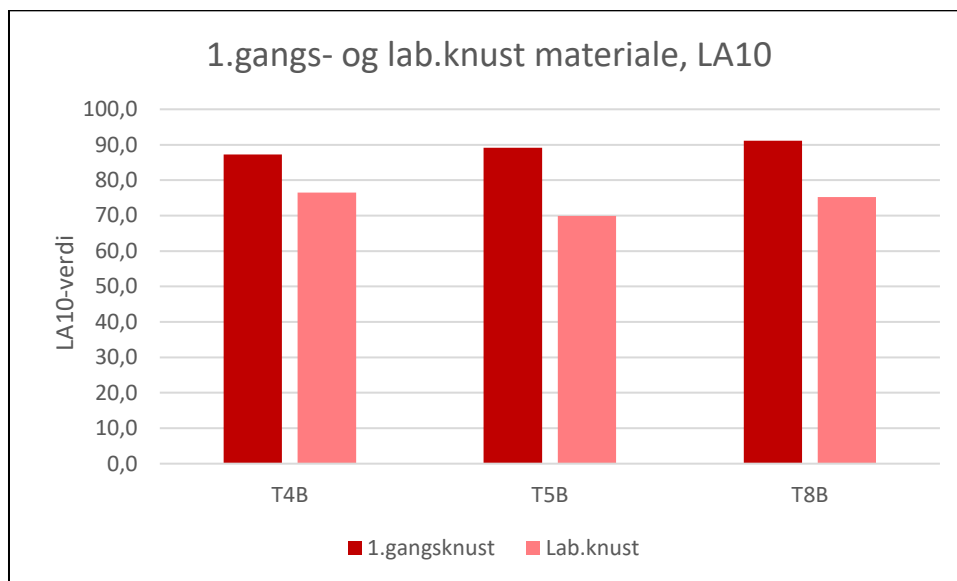
Figur 4.15 LA-verdier og FI (10-16 mm) for førstegangsknust og lab.knust materiale.



Figur 4.16 LA-verdier og SI for førstegangsknust (8-16 mm) og lab.knust (10-16 mm) materiale.

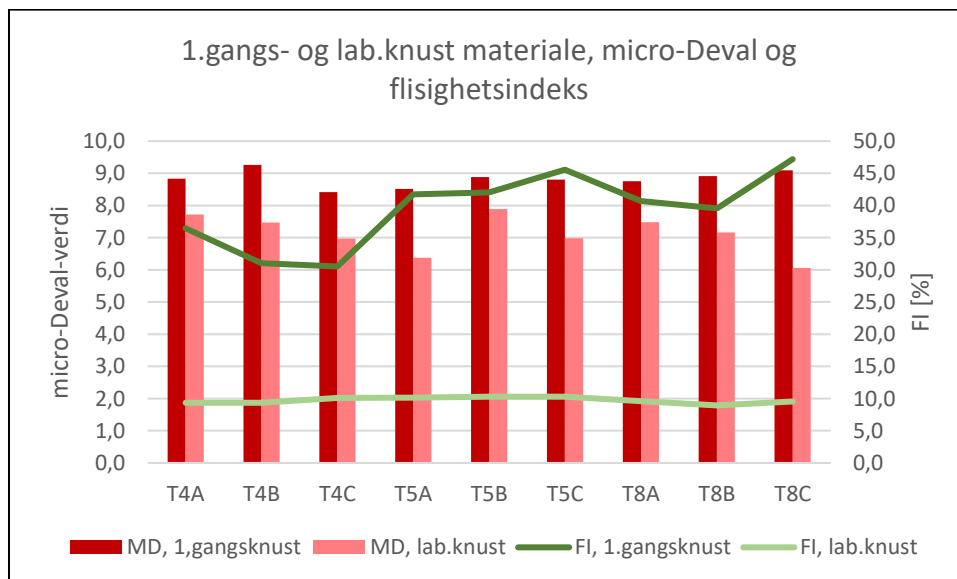
Den gjennomsnittlige LA-verdien synker fra 28,4 for det førstegangsknuste materialet til 20,2 for det laboratorieknuste materialet, hvilket innebærer en gjennomsnittlig nedgang på hele 29,1 %.

Også L_{Ax}-verdiene (her L_{A10} ettersom 10 mm er nederste sikt i testfraksjonen) viser samme tendens med en tydelig styrkeforbedring for de tre prøvene som utgjør sammenligningsgrunnlaget. Figur 4.17 viser at gjennomsnittlig L_{A10}-verdi synker fra 89,2 til 73,9 for prøvene T4B, T5B og T8B.

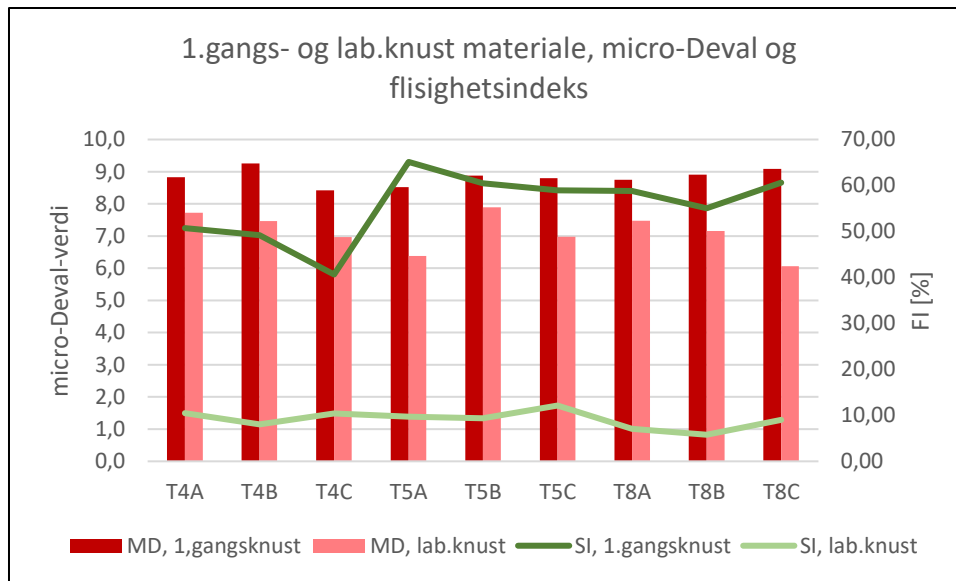


Figur 4.17 L_{A10}-verdier for førstegangs- og lab.knust materiale.

Figur 4.18 og Figur 4.19 viser micro-Deval-verdiene for førstegangsknust og laboratorieknust materiale sammen med henholdsvis flisigheten og stengligheten.



Figur 4.18 Micro-Deval-verdier og FI (10-16 mm) for førstegangs- og lab.knust materiale.



Figur 4.19 Micro-Deval-verdier og SI for førstegangsknust (8-16 mm) og lab.knust (10-16 mm) materiale.

Den gjennomsnittlige micro-Deval-verdien synker fra 8,8 til 7,1 som følge av de to ekstra knusetrinnene. Dette tilsvarer en gjennomsnittlig nedgang på 19,3 % og en betydelig styrkeforbedring.

Det er gjennomført t-tester for å undersøke hvorvidt testresultatene fra laboratorieknust materiale er signifikant mindre enn førstegangsknust materiale for samtlige tester. Dette innebærer da en forbedring i både kornform og styrkeegenskaper.

Resultatene er å finne i Tabell 14 og Tabell 15. Datasettene er valgt til å ha en ensidig fordeling med ulik varians. Signifikansverdien er satt til 0,05, og nullhypotesen tilsier at de laboratorieknuste materialene ikke har verdier som er signifikant mindre enn det førstegangsknuste materialet. Denne forkastes dersom P-verdien ligger under 0,05.

Tabell 14 vurderer resultatene fra samtlige materialer, mens det i Tabell 15 er tatt hensyn til at det kan være forskjeller mellom materialene.

Tabell 14 T-tester av metodene for førstegangs- og lab.knust materiale.

	P-verdi	<0,05?
Los Angeles	1,4E-09	ok
micro-Deval	4,6E-06	ok
Flisighetsindeks	1,4E-07	ok
Stenglighetsindeks	1,1E-08	ok

Tabell 15 T-tester av metodene for førstegangs- og lab.knust materiale, med hensyn på variasjoner mellom materialene.

	P-verdier					
	T4	<0,05?	T5	<0,05?	T8	<0,05?
Los Angeles	0,000	ok	0,001	ok	3,6E-05	ok
micro-Deval	0,006	ok	0,028	ok	0,018	ok
Flisighetsindeks	0,003	ok	0,001	ok	0,002	ok
Stenglighetsindeks	0,002	ok	0,0001	ok	3,6E-05	ok

Ettersom P-verdien i samtlige tilfeller er mindre enn 0,05 i både Tabell 14 og Tabell 15, kan det konkluderes med at det laboratorieknuste materialet ifølge t-testen gir signifikant mindre verdier for samtlige fire tester sammenlignet med det førstegangsknuste materialet.

Av disse resultatene synes det å være hevet over enhver tvil at materialenes styrkeegenskaper forbedres som følge av de to ekstra knusetrinnene. Dette kan komme som et resultat av forbedret kornform, men det kan også komme av at svake punkter og eventuelle mikroriss partiklene i større grad fjernes ved ytterligere knusing. Dette kontempleres ytterligere i Kapittel 5.4.

KAPITTEL 5. DISKUSJON

5.1 ANTAGELSER

Sammenhengene mellom kornform, mekaniske styrkeegenskaper og laboratorieknusing er kun belyst med materialer av én forekomst. Som følge av dette fjernes variabelen rundt forskjeller i materialets iboende egenskaper, som ville vært relevant ved testing av flere forekomster. Inhomogene materialer kan imidlertid gjøre dette aktuelt da bergarter som regel besitter ulike styrkeegenskaper. I tillegg fant Erichsen (2013) at «sterke» materialer har en tendens til å beskytte «svake» materialer i LA-trommelen.

Valget om kun å teste ett materiale er likevel et ankepunkt ved oppgaven, og resultatene som fremkommer gjelder i ytterste konsekvens kun for denne bergarten. Det er derfor nødvendig med ytterligere testing før en kan trekke noen generelle slutninger rundt laboratorieknusingens effekt på de mekaniske egenskapene.

Det antas at angulariteten og mikroteksturen er den samme for de ni prøvene. Disse er som kjent produsert ved samme pukverk og er følgelig av samme bergart. Det virker å være relativt høy konsensus rundt effektene av økt angularitet og mikrotekstur, og at dette medfører økt resilientmodul og synkende tverrkontraksjonstall (Barksdale and Itani, 1989, Thom, 1988, Uthus, 2007). Årsaken tilegnes en økning i antall kontaktpunkter mellom kornene, som igjen fordeler kreftene bedre og skaper mer friksjon mellom partiklene (Lekarp et al., 2000). Nålsund (2014) fant på sin side at økt angularitet og overflatetekstur medfører økt motstand mot abrasjon og dermed lavere micro-Deval-verdier.

Det fremkommer altså av litteraturen at eventuelle forskjeller i disse to materialegenskapene vil bidra til å gi forskjeller i resultatene. Antagelsen er i seg selv nødvendig for å øke oppgavens gjennomførbarhet, men det likevel ikke mulig å si med sikkerhet om angulariteten og mikroteksturen forandrer seg mellom de ulike prøvene før dette faktisk blir kvantifisert.

5.2 KORNFORM

5.2.1 KORRELASJON MELLOM FLISIGHETSINDEKS OG STENGLIGHETSINDEKS

Resultatene viser god korrelasjon mellom flisighetsindeks og stenglighetsindeks for materialene som helhet, med en korrelasjonsfaktor på 0,98. Det er funnet en viss korrelasjon mellom de enkelte delfraksjonene for testene, gitt at en ser bort ifra de to minste delfraksjonene 4-5 mm og 5-6,3 mm. I så tilfelle ligger gjennomsnittskorrelasjonen for seks av ni prøver på 0,83.

Den gode korrelasjonen stemmer godt med Chytla et al. (1995) som fant en korrelasjonsfaktor mellom flisighetsindeksen og stenglighetsindeksen på 0,98 for materialene vist ved Tabell 4.

Stenglighetsindeksen betrakter kornenes største og minste dimensjon, og prosentandelen korn der største dimensjon er tre ganger (eller mer) så stor som minste dimensjon beregnes. Derfor kan korn være stenglige enten som følge av at lengste dimensjon er særskilt stor eller at minste dimensjon er særskilt liten. Figur 5.1, med et bilde stenglige korn i 31,5-40 mm-fraksjonen til T8B, er et forsøk på å illustrere nettopp dette. Lange korn er samlet til venstre og mer flate korn med én spesielt liten dimensjon er samlet til høyre.



Figur 5.1 Stenglige korn som følge av stor lengste dimensjon eller liten minste dimensjon.

Flisighetsindeksen består på sin side av to sikteoperasjoner, én med kvadratiske sikt og én med stavsikt. Lees fant allerede på 1960-tallet at volumet på partiklene som passerer kvadratiske sikt i stor grad varierer med kornformen. Stangformede partikler som passerer et sikt har i gjennomsnitt 2,5 ganger så stort volum som diskformede partikler som passerer samme sikt (Uthus et al., 2005). Fernlund (1998) påpeker at det er det minste tverrsnittsarealet som først og fremst avgjør hvorvidt en partikkel passerer en sikt med kvadratisk åpning eller ikke. Stavsiktene er på sin side utformet på en måte som muliggjør gjennomgang for partiklens minste dimensjon.

Det er plausibelt at siden både flisighetsindeksen og stenglighetsindeksen involverer minste dimensjon av kornene, så er nettopp det en årsak til korrelasjon mellom metodene. Chytla et al. (1995) påpeker på sin side at både flisighetsindeksen og stenglighetsindeksen identifiserer «misdannede» korn, som kan bidra til korrelasjon.

Det er i arbeidet med oppgaven ikke undersøkt hvorvidt flisige korn er stenglige, eller i hvor stor grad stenglige korn er flisige, hvilket kan gi ytterligere informasjon om korrelasjonen mellom disse to testene. Det er heller ikke funnet litteratur på dette.

5.2.2 AVVIK PÅ STAVSIKTER

Stavsiktene omfattende avvik må diskuteres ytterligere. Det er i så måte interessant å belyse i hvor stor grad avvikene påvirker resultatene, og i hvilken retning de blir påvirket. Tabell 16 gir en oversikt over antall avvik for øvre og nedre toleransegrense for hver stavsikt.

Tabell 16 Antall avvik ved toleransegrensene.

Fraksjon	Stavsikt	Toleranse- grenser	Antall målinger	Ant. avvik nedre toleransegrense	Ant. avvik øvre toleransegrense	Gjennom- snittsverdi [mm]	Gjennomsnitts- verdiens avvik i %
80-100	50	±0,55	20	7	0	49,61	-0,78
63-80	40	±0,45	26	6	0	39,67	-0,82
50-63	31,5	±0,4	28	17	0	31,02	-1,52
40-50	25	±0,35	36	15	0	24,67	-1,32
31,5-40	20	±0,3	44	28	0	19,68	-1,60
25-31,5	16	±0,27	52	32	0	15,64	-2,25
20-25	12,5	±0,24	54	33	2	12,2	-2,40
16-20	10	±0,21	64	33	3	7,75	-22,50
12,5-16	8	±0,19	84	55	4	7,76	-3,00
10-12,5	6,3	±0,17	101	54	7	6,07	-3,65
8-10	5	±0,14	112	68	19	4,8	-4,00
6,3-8	4	±0,13	116	53	13	3,88	-3,00
5-6,3	3,15	±0,11	182	14	168	3,88	23,17
4-5	2,5	±0,11	161	23	138	3,01	20,40

For stavsiktene på 2,5 mm og 3,15 mm er det liten tvil om at flisighetsindeksen blir for høy som følge av feilproduksjonen. Gjennomsnittlig spalteåpning ligger i begge tilfeller godt over nominell spalteåpning, og en ser av Tabell 16 at det klare flertall av målinger ligger over øvre toleransegrense. 138 av 161 målinger ligger over øvre toleranse for 2,5 mm-siktet, mens 168 av 182 målinger overstiger øvre toleranse for 3,15 mm-siktet. De ekstreme flisighetsverdiene som er vist for delfraksjonene 4-5 mm og 5-6,3 mm har derfor sin naturlige forklaring i de registrerte avvikene. Dette vil likevel ikke utgjøre særlig forskjell på endelig FI, da massen som utgjør disse fraksjonene kun utgjør 2-4 % av 4-100 mm-materialet som testes.

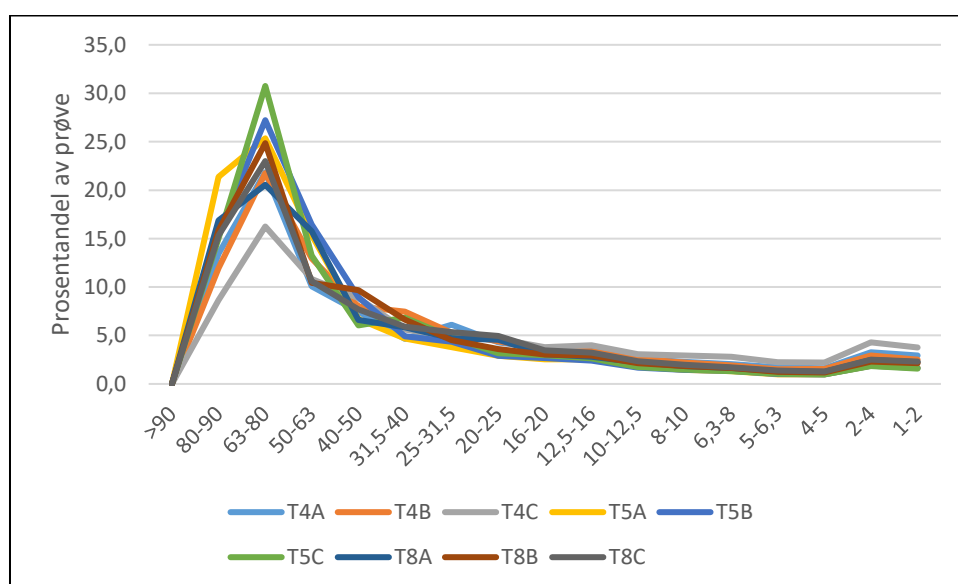
For de seks delfraksjonene med stavsikter på 4 mm og opp til 12,5 mm er det noe vanskeligere å avgjøre effekten av siktens avvik. Gjennomsnittlig åpning er mindre enn dimensjonert spalteåpning, men det er for samtlige sikter registrert avvik både over øvre toleransegrense og under nedre toleransegrense. Likevel, som en ser av Tabell 16, så er det få avvik over maksimumsverdien, spesielt for siktene 6,3 mm, 8 mm, 10 mm og 12,5 mm. 10 mm-siktet skiller seg ut fra denne gruppen gjennom at gjennomsnittsverdien på avviket er hele 22,5 % fra nominell åpning. I disse tilfellene, ved siktene fra 4 mm til 12,5 mm spalteåpning, er det sannsynlig at for lite materiale slipper gjennom som følge av avvikene.

For stavsiktene fra 16 mm og opp til 50 mm er det ikke tvil rundt effekten av produksjonsfeilen. Det er her ikke registrert avvik over øvre toleransegrense, og for lite materiale slipper derfor gjennom for samtlige av disse seks delfraksjonene.

Selv om det ved kjøp av laboratorieutstyr forventes at produktene ligger innenfor gjeldende krav til utstyret, vitner det om naivitet fra operatøren (undertegnede) sin side å ikke kontrollere dette i forkant av bruksperioden.

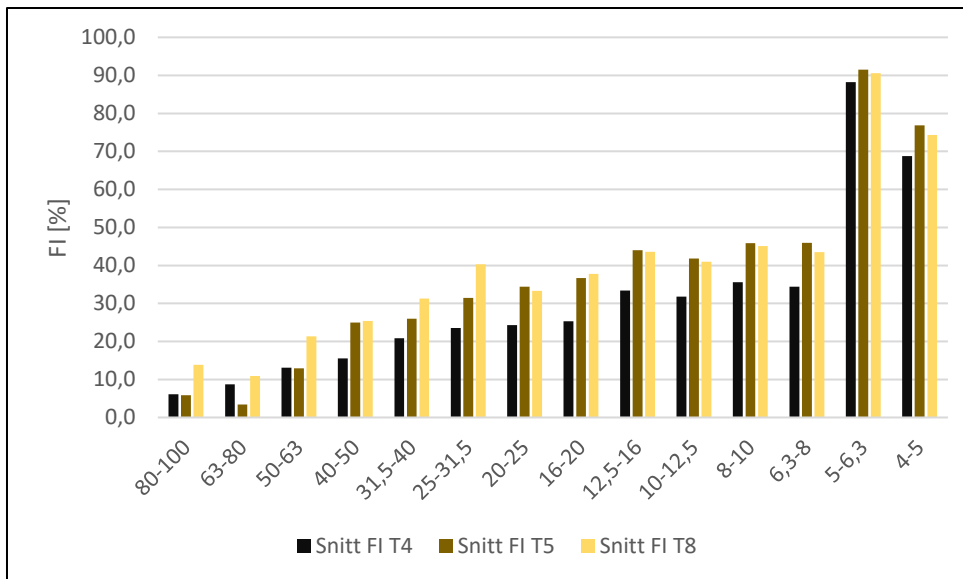
5.2.3 EFFEKT AV PARAMETRE VED FØRSTEGANGSKNUSING

Det er tidligere observert at grovere fraksjoner tenderer mot å ha en mer kubisk kornform enn finere fraksjoner (Chytla et al., 1995, Viman and Broms, 2005). Samtidig er knuseråpningen ved produksjon satt til 70 mm, og det er som følge av dette produsert mest materiale på 63-80 mm-fraksjonen for samtlige materialer. Dette vises ved Figur 5.2, der samtlige materialer har et knekkpunkt ved nevnte fraksjon. Litteraturen tilsier da at delfraksjonene rundt 63-80 mm-fraksjonen skal være de minst flisige (Selmer-Olsen, 1980, Heikkila, 1991).



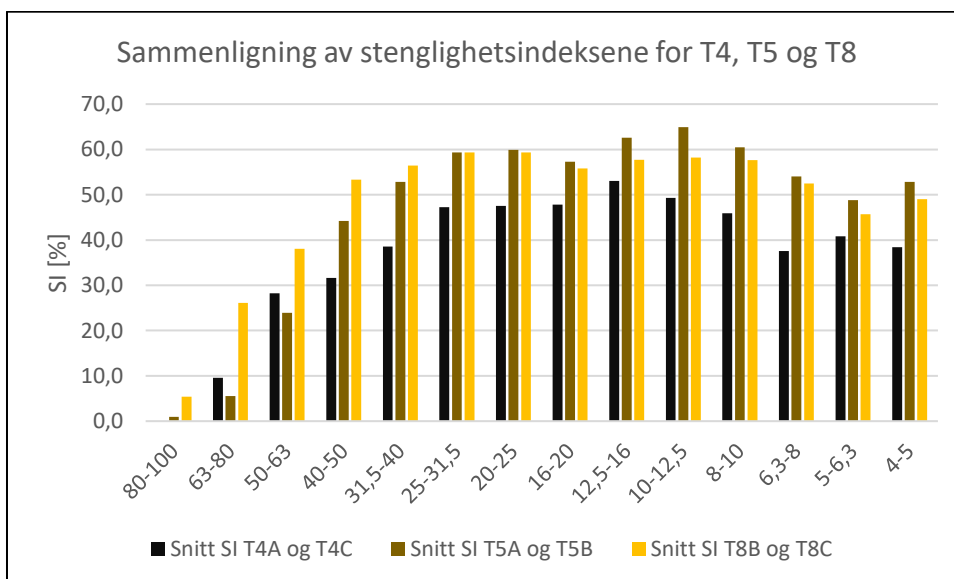
Figur 5.2 Prosentandel masse ved delfraksjonene.

Litteraturen stemmer i så måte godt overrens med de funnene som er gjort i oppgaven. Materialene er helt tydelig mer kubiske for delfraksjonene rundt 63-100 mm, og flisigheten er jevnt stigende for de mindre delfraksjonene, som vist i Figur 5.3.



Figur 5.3 Sammenligning av flisighetsindeksene for T4, T5 og T8.

Også ved sammenligning av stenglighetsindeksene kommer det frem at de mest kubiske materialene er produsert i delfraksjonene 63-100 mm, som vist på Figur 5.4. T4A, T4B, T5A, T5B, T8B og T8C utgjør i dette tilfellet sammenligningsgrunnlaget.



Figur 5.4 Sammenligning av stenglighetsindeksene for T4, T5 og T8.

Hvorvidt det er de grove delfraksjonenes nærhet til knuseråpningen eller om det er de grove kornene i seg selv som gjør at flisigheten og stengligheten er lav ved de største delfraksjonene er imidlertid vanskelig å avgjøre.

Figur 5.4 viser også at stengligheten generelt er høy for delfraksjonene rundt testfraksjonen 10-14 mm, som vist tidligere. Årsaken til den lite gunstige kornformen for 10-16 mm-fraksjonen for samtlige

materialer kan komme av at disse ligger langt unna de delfraksjonene hvor mest materiale er produsert ved førstegangsknusingen.

Figur 5.3 og Figur 5.4 viser også at T4-materialet har den mest kubiske kornformen som følge av førstegangsknusingen. Dette ble fullmatet i knuseren, samtidig som T4- og T5-materialene i større grad var velgraderte enn T8-materialet. Eloranta (1995) fant at en av de viktigste parametrene for sluttproduktets kubisitet som følge av knusing var kornstørrelsefordelingen til inngangsmaterialet. Dette bør ha et visst innhold av finstoff for å maksimere effekten av interpartikulær knusing. Shergold (1959) og Ulvik (1994) påpeker viktigheten av å holde et høyt matningsivå. På bakgrunn av dette er det ikke overraskende at T4-materialet har den minst flisige og stenglige kornformen.

5.3 KORNFORM OG STYRKEEGENSKAPER FOR FØRSTEGANGSKNUST MATERIALE

Det er ikke funnet en sammenheng mellom kornform og mekaniske egenskaper for det førstegangsknuste 0-90 mm-materialet. En årsak til dette, gitt at en sammenheng er mulig å påvise for det aktuelle materialet, kan være for liten variasjon i flisighetsindeks og stenglighetsindeks. Det er vist at T4-materialet er signifikant forskjellig fra T5- og T8-materialene, men det er likevel sannsynlig at større relative forskjeller mellom materialene er nødvendig.

Av de fire testene som er gjennomført i oppgaven vil alle, med unntak av flisighetstesten, gi noe varierende resultater fra gang til gang. Dette er vist både ved Los Angeles og micro-Deval gjennom en viss variasjon mellom parallellene. Stenglighetsindeksen kan variere i og med at prøven splittes ned og minst 100 korn utgjør selve testfraksjonen. Dette kan sees på som et hinder for å se tydelige sammenhenger mellom kornform og mekaniske egenskaper, spesielt ved et så begrenset antall tester som er gjennomført i dette tilfellet. En fortsettelse av denne analogien tilsier at sammenhengen mellom kornform og mekaniske egenskaper må være så sterk at denne overgår variablene som preger metodene. For å muliggjøre en slik sammenheng kan det være at ekstremverdier hva gjelder kornformen er nødvendig.

I tilfellet hvor Erichsen et al. (2010) påviste en tydelig sammenheng mellom flisighetsindeks og micro-Deval-verdier kom dette som følge av en økning i flisighetsindeks fra 6,9 % til 33 % for porfyrmaterialet og fra 9,3 % til 21 % for monsonittmaterialet. Dette ga en økning i micro-Deval-verdier fra 2,3 til 9,9 for porfyrmaterialet og fra 9,9 til 19 for monsonittmaterialet. Dette vises også i Figur 2.23.

Lignende poeng kan også trekkes frem i Benediktsson and Wigum (2015) sitt tilfelle, som kunstig vartierte flisighetsindeksen fra 0 til 100 % (fra 25 % til 75 % i de fleste tilfellene) og som med dette viste korrelasjon mellom kornform og LAx- og MDx-verdiene.

Det ser av dette ut til at det først ved store relative endringer i flisighetsindeks er mulig å påvise en tydelig sammenheng mellom kornform og flisighet. Selv om T4-materialet viste seg å være signifikant forskjellig fra de to resterende materialene i en t-test, er det sannsynlig at den relative forskjellen likevel ikke er stor nok til å frembringe de sammenhenger som det jaktes på i denne oppgaven. Det er likevel en mulighet for at en sammenheng mellom kornform og mekaniske egenskaper er påvist gjennom forbedret kornform ved laboratorieknusing, hvilket avveies videre i kap. 5.4.

Det er i oppgaven kun funnet tre LAx-verdier og ingen MDx-verdier for det førstegangsknuste materialet, hvilket svekker sammenligningsgrunnlaget mellom kornform og styrkeegenskapene. Dette er definitivt en svakhet ved arbeidet.

5.4 EFFEKT AV LABORATORIEKNUSING

Som følge av laboratorieknusing av korn større enn 63 mm, er det vist signifikant forbedring for flisighetsindeks, stenglighetsindeks, micro-Deval og Los Angeles. Knusingen har foregått i henhold til gjeldende praksis hva fremgår av Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser (Statens vegvesen, 2016) og optimal knusing er vektlagt.

Tabell 17 gir en oppsummering av resultatene for materialene ved førstegangs- og laboratorieknusing.

Tabell 17 Oppsummering av testresultater etter førstegangs- og laboratorieknusing.

Materiale	Førstegangsknust materiale				Laboratorieknust materiale			
	MD	LA	FI (10–16 mm)	SI (8–16 mm)	MD	LA	FI (10–16 mm)	SI (10–16 mm)
T4A	8,8	28,2	36,4	50,7	7,72	21,9	9,38	10,5
T4B	9,3	27,6	31,1	49,2	7,47	21,0	9,33	8,0
T4C	8,4	27,3	30,5	40,6	6,97	20,3	10,11	10,4
T5A	8,5	29,0	41,7	65,1	6,38	20,0	10,16	9,7
T5B	8,9	27,1	42,0	60,5	7,89	18,1	10,29	9,3
T5C	8,8	26,1	45,5	58,9	6,98	18,7	10,30	12,1
T8A	8,8	31,0	40,7	58,8	7,48	20,3	9,58	7,0
T8B	8,9	30,2	39,6	55,1	7,16	21,2	8,94	5,8
T8C	9,1	29,5	47,2	60,6	6,06	20,0	9,57	9,0

Den største relative endringen er observert for kornformen. Den gjennomsnittlige flisighetsindeksen for 10-16 mm-fraksjonen for samtlige materialer faller fra 39,4 % til 9,7 %. Tilsvarende faller stenglighetsindeksen fra 55,5 % til 9,1 %. Også styrkeegenskapene viser betydelige relative endringer. Gjennomsnittlig LA-verdi synker fra 28,4 til 20,2, mens tilsvarende micro-Deval-verdi synker fra 8,8 til 7,1.

Det undersøkte Nokiamaterialet har en deklart LA-verdi på 26 og en deklart micro-Deval-verdi på 9 (se Vedlegg G). Tabell 18 gir en oversikt over kategoriens maksimalverdier ved LA-testen. En differanse på fem skiller de ulike kategoriene, hvilket understreker at den styrkeøkningen som fremkommer som følge av de ekstra to knusetrinnene er betydelig.

Tabell 18 Kategorier for maksimalverdier for LA-verdier. (Norsk Standard, 2009)

Los Angeles-verdi	Kategori LA
≤ 20	LA ₂₀
≤ 25	LA ₂₅
≤ 30	LA ₃₀
≤ 35	LA ₃₅
≤ 40	LA ₄₀
A ₁ > ≤ 45	LA ₄₅ < A ₁
≤ 50	LA ₅₀
≤ 60	LA ₆₀
> 60	LA _{Deklarert}
Ingen krav	LA _{IK}

Hva er så årsaken til denne signifikante forbedringen i styrkeegenskaper for det laboratorieknuste materialet?

Det er tidligere funnet en viss korrelasjon mellom LA-testen og flisigheten, men LA-testen har generelt vist seg å være lite sensitiv for endringer i denne parameteren (Selmer-Olsen, 1980, Erichsen et al., 2010, Benediktsson and Wigum, 2015). Micro-Deval har på sin side vist seg i større grad å respondere på ulike verdier for flisighetsindeksen (Erichsen et al., 2010, Rigopoulos et al., 2013). Felles for disse funnene er at den relative endringen i kornform sannsynligvis bør være betydelig for at det skal være mulig å påvise en sammenheng.

På den andre siden ble det tidlig funnet at små sprekker i materialene betydelig reduserer styrken og at bruddplanene først vil oppstå rundt slike sprekker (Griffith, 1921). Stenlid (1996) påpeker at mikrosprekker i steinpartikler kan komme av sprengningen i fjellet i produksjonsfasen. Heikkila (1991) argumenterer på sin side for at når steinene tenderer mot å få brudd langs de svakere planene vil de på den måten gjenopprette sine iboende styrkeegenskaper til senere knusetrinn.

Av litteraturen kommer det frem at de forbedrede styrkeegenskapene kan komme av at svakheter ved kornene, som mikroriss og sprekker, fjernes ved laboratorieknusingen og dermed gjør at materialet gjenoppretter sine iboende styrkeegenskaper. En annen mulig årsak er den signifikant forbedrede kornformen, som reduserer finstoffproduksjonene i trommeltestene Los Angeles og micro-Deval.

Nokiamaterialet er et mellomsterkt materiale. Det laboratorieknuste materialet er kjørt gjennom to til tre sikteoperasjoner, splitting og veiing etter nedknusing. Hvis finstoffproduksjonen i løpet av disse operasjonene er betydelig, -kan det medføre at kantene slipes ned og videre gir forbedrede styrkeegenskaper som følge av at svake punkter på partiklene fjernes?

Det er kun mulig å undersøke delfraksjonenes massetap *etter* første sikting, som vises i Tabell 19 som «opprinnelig masse». «Etter FI» innebærer fraksjonens vekt etter gjennomført sikting med stavsikter. Deretter er materialet splittet og stengligheten er funnet. «Etter SI» gir fraksjonens masse etter dette, hvilket ikke bør innebære særlig med massetap. Av Tabell 19 fremkommer det at materialene (T4A, T5B, T8A) har et massetap på rundt 10-12 g hovedsakelig som følge av sikteoperasjonen med stavsikter.

Tabell 19 Massetap som følge av ulike operasjoner.

Materiale	Fraksjon	Oppr. masse	Etter FI	Etter SI	SUM tap
T4A	12,5/16	5218,7	5207,8	5207	11,7
T5B	12,5/16	5553,1	5542,3	5542,3	10,8
T8A	12,5/16	5446,5	5436,5	5435,4	11,1

Figur 5.5 viser typisk finstoffproduksjon som følge av nettopp stavsiktingen. 12,5-16 mm-fraksjonene utsettes for ytterligere to sikteoperasjoner med kvadratiske sikter, mens 10-12,5-fraksjonene kun utsettes for én sikting med kvadratiske sikt i tillegg til stavsiktingen.



Figur 5.5 Finstoffproduksjon som følge av en sikteoperasjon med stavsikt.

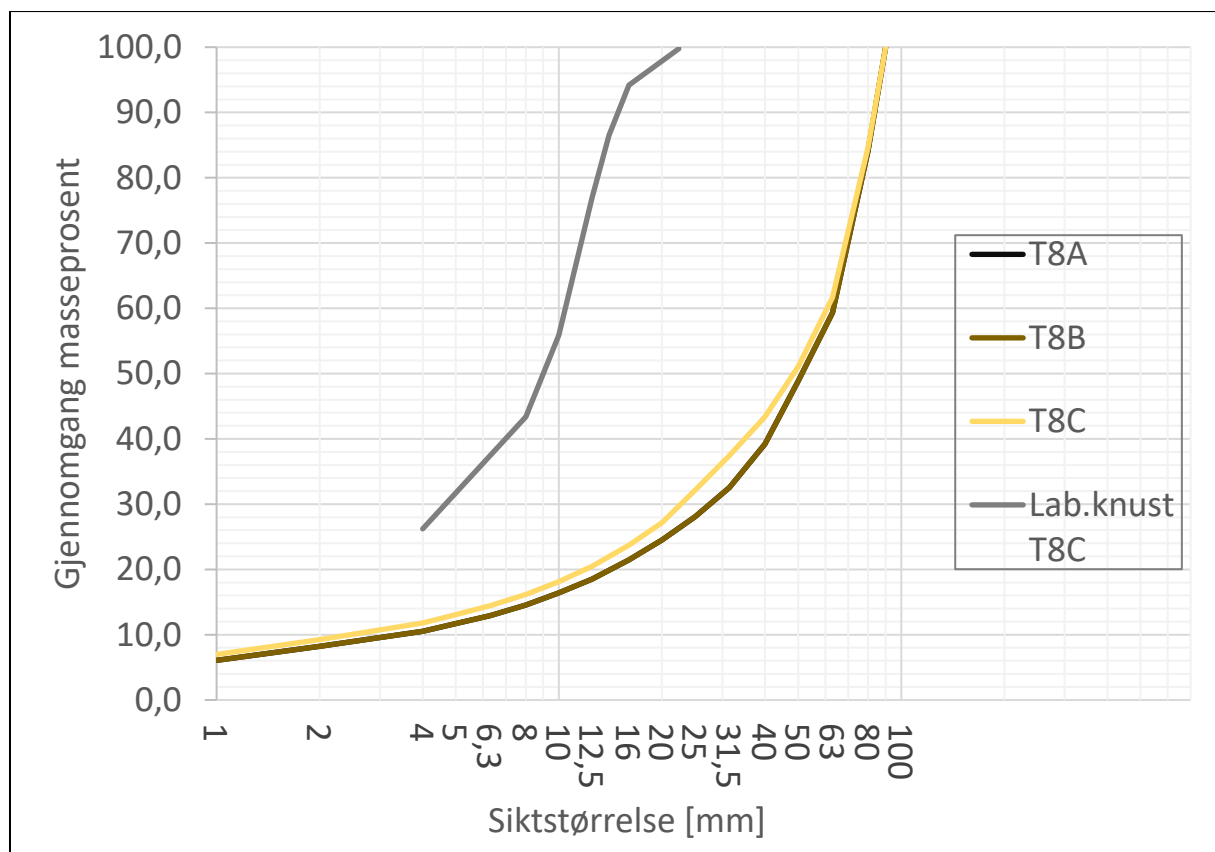
Materialene er ikke vasket og tørket i forkant av disse operasjonene, slik at det ikke er mulig å avgjøre i hvor stor grad finstoffet er «ristet» av større partikler eller om de er slipt av kantene. Av Figur 5.5 ser en at finstoffet har en viss gradering, og det er i så fall kun de mindre støvpartiklene som kan ha blitt ristet av de større partiklene.

Det er i det hele tatt ikke mulig å avgjøre hvorvidt behandlingen av de laboratorieknuste materialene i forkant av Los Angeles og micro-Deval har påvirket styrkeegenskapene i positiv retning med den

testplanen som er utført i arbeidet til oppgaven. Dette kan ha gitt et bidrag til den økte styrken. Det førstegangsknuste materialet, som ligger til grunn for sammenligningen, har på sin side også gjennomgått sikteoperasjoner i Finland og ved Sentrallaboratoriet. Dette kan nulle ut en eventuell effekt av nedsliping av svake punkter på partiklene ved sikting. Hvis lignende arbeid i senere tid skal gjennomføres kan det være et poeng å begrense effekten gjennom å teste hardere bergarter som i mindre grad gir finstoffproduksjon ved sikting. Som et annet forslag til videre arbeid kan det også være aktuelt å analysere eventuelle mikrosprekker ved de største partiklene for på den måten å belyse hvorvidt disse bidrar til økte styrkeegenskaper ved laboratorieknusing.

Et annet aspekt som er av faglig interesse, men som ikke gir noe ytterligere klarhet i årsaken til styrkeforbedringen ved laboratorieknusingen, er finstoffproduksjonen under knuseprosessene. Eibs fant ifølge Höbeda (1988) at steiner som mates i trykknuser påføres 1-3 spenninger. En økning i antall spenninger som påføres et materiale under knusing, vil gi et forbedret sluttprodukt. Når det kun mates én og én stein i knuseren oppstår det få kontaktpunkter mellom knuserplatene og steinene, samt at dette gir lite interpartikulær knusing. Første knusestrinn i laboratorieknusingen gir derfor dårlig knusing.

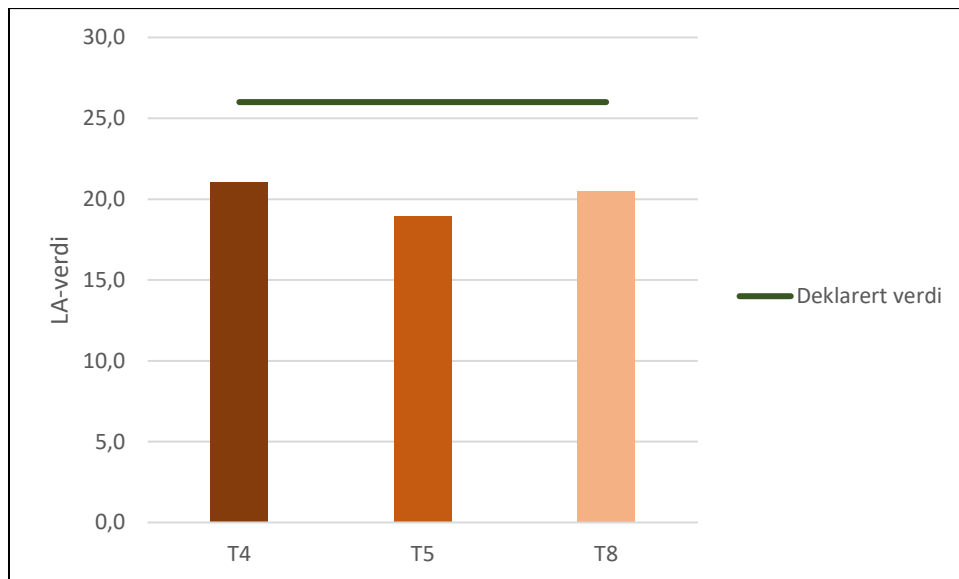
Ved andre knusestrinn holdes det derimot høyt matenivå gjennom at alt materialet helles i knuseren samtidig. Her oppholder materialet seg lenger i knusekammeret og blir i større grad «kvernet» ned mot knuserplatene og gjennom partikulær kontakt. Svake kanter fjernes som følge av den abrasive knusingen. Ved visuell observasjon er det registrert at reduksjonsraten er liten ved dette andre knusestrinnet, hvilket, ifølge Heikkila (1991), gir god knusing i form av et mer kubisk sluttprodukt. Denne formen for knusing gir finstoffproduksjon gjennom at steinene kvernes mot hverandre, og det er derfor av interesse å undersøke kornstørreledistribusjonen som følge av førstegangs- og laboratorieknusing. Ved kontroll av optimal knusing ble det gjennomført en sikteanalyse for T8C, men denne går kun ned til 4 mm, som vist på Figur 5.6.



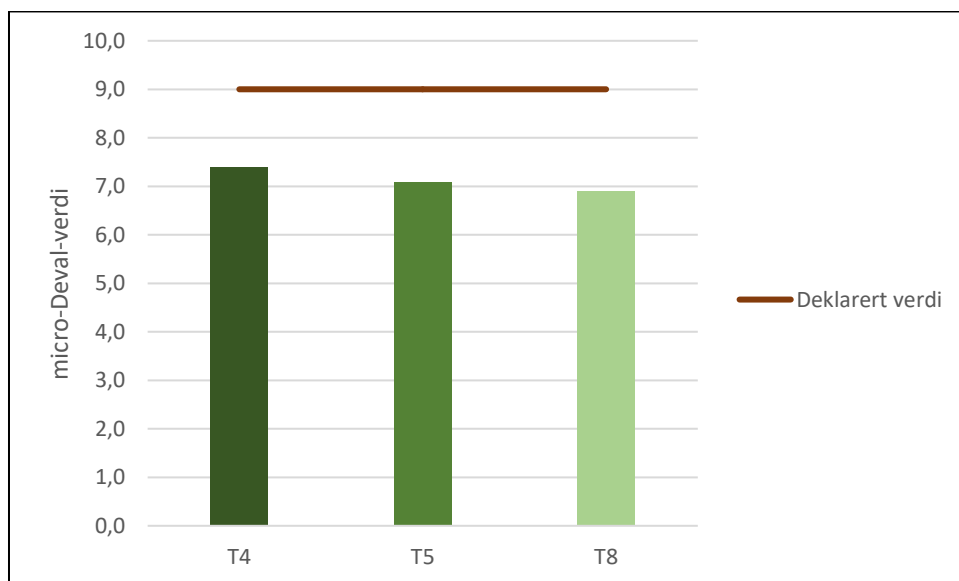
Figur 5.6 Sammenligning av kornkurver for T8-materialet, også etter lab.knusing.

Det er vanskelig å sammenligne finstoffproduksjonen ved førstegangs- og laboratorieknusing med det datamaterialet som er utarbeidet i forbindelse med oppgaven, effektivt vist gjennom Figur 5.6. Hvis finstoffproduksjonen er større ved sistnevnte knusing så ville det bidratt til å forklare den signifikante kornformforbedringen.

Som tidligere nevnt har Nokiamaterialet en deklartert LA-verdi på 26 og en deklartert micro-Deval-verdi på 9. Figur 5.7 og Figur 5.8 viser gjennomsnittet av materialenes LA- og micro-Deval-verdi etter laboratorieknusing, som er betydelig bedre enn de deklarererte verdiene.



Figur 5.7 Gjennomsnittlige LA-verdier for laboratorieknust materiale.



Figur 5.8 Gjennomsnittlige micro-Deval-verdier for laboratorieknust materiale.

Det kan mistenkes at kornformen gir et bidrag til de mekaniske egenskapene og at styrkeverdiene av den grunn i så stor grad er mindre enn de deklarete verdiene. Dette er imidlertid vanskelig å vurdere videre uten ytterligere kunnskap om hvordan de deklarete verdiene fastsettes.

Funnene som er gjort i oppgaven kan likevel grunnge en problematisering rundt rådende praksis ved testing av ubundne materialer på norske veger. Normal praksis er i dag å hente ut større partikler fra vegkroppen for så å knuse disse ned til testfraksjonen 10-14 mm ved det aktuelle laboratoriet. Siden kontrolleres materialenes styrkeegenskaper gjennom Los Angeles og micro-Deval opp mot kravene gitt ved Håndbok N200 Vegbygging.

Det er i oppgaven vist at, for et mellomsterkt Nokiamateriale, så kan disse to ekstra knusetrinnene som påføres materialet gi signifikante endringer i materialets kornform og mekaniske egenskaper. Laboratorieknusingen kan med det gjøre at de testede materialene i mindre grad representerer det faktiske materialet som ligger i vegkroppen, hvilket er testenens formål i utgangspunktet.

KAPITTEL 6. KONKLUSJON

Det er funnet god korrelasjon mellom stenglighetsindeks og flisighetsindeks for de ni resultatene fra det førstegangsknuste 0-90 mm-materialet, og denne korrelasjonen stemmer godt overrens med øvrig litteratur. Korrelasjonen mellom de enkeltvise delfraksjonene er imidlertid noe mindre mellom flisigheten og stengligheten, med en korrelasjonsfaktor på 0,83 i gjennomsnitt.

Det er i etterkant av laboratoriearbeidet funnet avvik ved samtlige stavsikter som er benyttet til å finne flisighetsindeksen i oppgaven. Avvikene er spesielt store for stavsiktene på 2,5 mm og 3,15 mm, samt at gjennomsnittlig spalteåpning her er større enn nominell spalteåpning. Dermed er flisighetsresultatene for tilhørende delfraksjoner (4-5 mm og 5-6,3 mm) sannsynligvis langt høyere enn det materialets egentlige flisighet skulle tilsi.

For stavsiktene fra 4 mm og opp til 12,5 mm ligger gjennomsnittlig spalteåpning og flertallet av målingene under minste toleransegrense. Det er dermed sannsynlig at for lite materialet har passert disse siktene og videre gitt for lav flisighetsindeks. For stavsiktene fra 16 mm og opp til 50 mm er målingene entydige i form av at ingen spalter ser ut til å overstige øvre toleransegrense. Det kan derfor konkluderes med at disse siktene med all sannsynlighet gir for lav flisighetsindeks. En naturlig konsekvens av feilproduksjonen er at oppgavens konklusjoner i større grad lener seg på stenglighetsindeksen.

T4-materialet fikk ved førstegangsknusing den mest kubiske kornformen. Dette kommer som en følge av at inngangsmaterialet var blant de to mest velgraderte, samtidig som knusekammeret ble fullmatet. Begge disse faktorene forsterker effekten av interpartikulær knusing og resultatet er i så måte forventet.

Til tross for at T4-materialet gjennom t-tester viste seg å være signifikant forskjellig fra T5 og T8 med tanke på kornform rundt testfraksjonen (10-14 mm), er det ikke påvist noen sammenheng mellom kornform og de mekaniske egenskapene for det førstegangsknuste materialet. Det betyr ikke at sammenhengen ikke er til stede. Sannsynligvis må forskjellen i kornform mellom materialene være langt større enn det som er observert i disse tilfellene. Både de mekaniske testene og stenglighetsmetoden er preget av visse variasjoner, hvilket er en hindring for å påvise korrelasjonene mellom kornform og mekaniske egenskaper. Også i tidligere tilfeller har store relative forskjeller i kornform vært nødvendig for å påvise denne sammenhengen.

Samtlige tre materialer og deres paralleller viste betydelige kornforms- og styrkeforbedringer som følge av laboratrieknusingen av håndstykker større enn 63 mm. Det er identifisert to mulige årsaker til dette.

1. Materialenes kubisitet har økt betraktelig. Dette kan ha gjort partiklene mer motstandsdyktige mot slitasje og nedknusing gjennom at kubiske partikler har færre svake punkter. Følgelig motstår materialene belastningene som de blir utsatt for i trommeltestene bedre.
2. Laboratrieknusingen kan ha bidratt til å fjerne svakheter i form av mikroriss og sprekker i steinene, og videre gjort at materialet har gjenopprettet sine iboende styrkeegenskaper. Også behandlingen som materialet har gjennomgått etter knusing i form av sikting, splitting og veiing kan ha bidratt til nedsliping av kantene før den styrkemessige testingen, og på den måten ha redusert senere finstoffproduksjon i mølletestene. Det er imidlertid usannsynlig at sistnevnte effekt i betydelig grad har bidratt til styrkeøkningen.

Det er ikke grunnlag for å konkludere hvorvidt én eller begge disse effektene bidrar til styrkeforbedring ved laboratrieknusing for de ni prøvene som er testet i forbindelse med oppgaven.

Det er vist at knusingen har en signifikant effekt på både kornform, vist ved flisighetsindeks og stenglighetsindeks, og mekaniske egenskaper vist ved Los Angeles og micro-Deval. Disse resultatene problematiserer gjeldende praksis, som innebærer å laboratorieknuse testmateriale som er hentet fra vegkroppen i forkant av trommeltestene. Konsekvensene av knusingen bør derfor studeres ytterligere.

KAPITTEL 7. VIDERE ARBEID

Det er i oppgaven funnet at laboratorieknusing kan ha signifikant betydning for både kornform og styrkemessige egenskaper for et granodiorittmateriale fra Nokia, Finland. Som en naturlig fortsettelse av oppgaven bør det derfor undersøkes videre om dette også gjelder for typisk norske vegbyggingsmaterialer, hvilket bør være gjennomførbart på masternivå. En virkelighetsnær tilnærming til dette kan være å hente ubundne materialer ut ifra vegkroppen, hvilket kan skje i forbindelse med andre arbeider. Dette materialet kan testes for både kornform og mekanisk styrke før større partikler knuses ned slik normal prosedyre tilsier. Hvis det laboratorieknuste materialet også testes med tanke på kornform og styrkeegenskaper, så vil det være grunnlag for å si noe om effekten av de to ekstra knusetrinnene og problematikken kan ytterligere belyses.

I videre arbeid bør det i større grad bli tatt hensyn til LAx- og MDx-verdiene enn det er blitt gjort i denne oppgaven, da det tidligere er funnet at dette øker analyseområdet til testene.

Undertegnede vil også anbefale å utføre kontroll av utstyret som skal benyttes i forkant av testing.

Det er i oppgaven ikke tatt hensyn til eventuelle forskjeller i angularitet og mikrotekstur mellom de ulike prøvene. Ved videre arbeid kan dette være faktorer som bør kontrolleres for å avdekke hvorvidt disse påvirker de mekaniske egenskapene.

Av mulig videre arbeid innenfor fagområdet som omhandler tilslagsmaterialer til vegkonstruksjoner kan LA-metoden for ballastfraksjonen 31,5-50 mm være et tema for senere masteroppgaver. Erichsen (2013) viser at LA-testen for denne fraksjonen først og fremst er en slitasjetest, hvilket gir et behov for en knusetest for de grovere fraksjonene. Ved å endre variabler rundt metoden, som antall stålballer, mengde prøvemateriale eller tromletid, kan det være faktorer som gir økt knusing.

REFERANSER

2017. Granodioritt. In: SELBEKK, R. S. (ed.) *Store norske leksikon*.
- ANDERSSON, T. 2010. *Estimating particle size distributions based on machine vision*. Luleå tekniska universitet.
- BARKSDALE, R. D. & ITANI, S. Y. 1989. Influence of aggregate shape on base behavior. *Transp. Res. Rec.*, 1227, 173.
- BENEDIKTSSON, S. & WIGUM, B. J. 2015. Effects of Particle Shape on Mechanical Properties of Aggregates. NTNU.
- BLOTT, S. J. & PYE, K. 2008. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*, 55, 31-63.
- CHYTLA, J., HÖBEDA, P. & VIMAN, L. 1995. En jämförelse av flisighetstal med föreslagna europastandarder: Flakiness index och Shape index. Statens väg-och transportforskningsinstitut., VTI notat 64-1995.
- ELORANTA, J. 1995. *Influence of crushing process variables on the product quality of crushed rock*, Tampere University of Technology.
- ERICHSEN, E. 1992. Knuseprosedyrens innvirkning på fallprøven. Delrapport 1., 70.
- ERICHSEN, E. 2013. Vurdering av testmetoder for tilslagsmaterialer. Statens vegvesen.
- ERICHSEN, E., ULVIK, A. & SÆVIK, K. 2011. Mechanical degradation of aggregate by the Los Angeles-, the micro-deval-and the Nordic test methods. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44, 333.
- ERICHSEN, E., ULVIK, A., VONGRAVEN, H., TANGSTAD, R. & FOSSAN, B. 2010. Miljøvennlige vegdekker - Materialtekniske egenskaper for ulike testfraksjoner. Norges geologiske undersøkelse.
- FERNLUND, J. 2005. 3-D image analysis size and shape method applied to the evaluation of the Los Angeles test. *Engineering geology*, 77, 57-67.
- FERNLUND, J. M. 1998. The effect of particle form on sieve analysis: a test by image analysis. *Engineering Geology*, 50, 111-124.
- GRIFFITH, A. A. 1921. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, 221, 163-198.
- HEIKKILA, P. 1991. Improving the quality of crushed rock aggregate. *Acta polytechnica Scandinavica; N96*.
- HOFF, I. 1999. *Material properties of unbound aggregates for pavement structures*. 1999:53, Department of Road and Railway Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- HOFF, I. 2008. Properties of unbound granular materials. *Required reading material for the course TBA4340 Pavement technology* [Online].
- HOSSAIN, M., LANE, D. & SCHMIDT, B. 2008. Use of the Micro-Deval Test for Assessing Fine Aggregate Durability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 11-19.
- HÖBEDA, P. 1988. Krossningens betydelse på stenkvalitet, særskilt med avseende på kornform: en litteraturstudie. Statens Väg-och Trafikinstitut., VTI notat V 68.
- ISO 2013. 3310-2 Test sieves - Technical requirements and testing - Part 2: Test sieves of perforated metal plate.
- JANOO, V. 1998. Quantification of shape, angularity, and surface texture of base course materials. COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LAB HANOVER NH.
- JANOO, V. C. & BAYER II, J. J. 2001. The Effect of Aggregate Angularity on Base Course Performance. Vermont Agency Of Transportation, Montpelier.

- KOLISOJA, P. 1997. *Resilient deformation characteristics of granular materials*, Tampere, Tampere University of Technology.
- KRUMBEIN, W. C. 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 11.
- LANG, A., RANGE, P., FOWLER, D. & ALLEN, J. 2007. Prediction of coarse aggregate performance by micro-deval and other soundness, strength, and intrinsic particle property tests. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 3-8.
- LEKARP, F., ISACSSON, U. & DAWSON, A. 2000. State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126, 66-75.
- MASAD, E. 2007. *Test methods for characterizing aggregate shape, texture, and angularity*, Transportation Research Board.
- NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE. 2017. *Produksjon av grus og pukk* [Online]. Available: https://www.ngu.no/emne/produksjon_av_grus_og_pukk [Accessed 15.12.2017].
- NORSK STANDARD 2008. 933-4 Prøvmingsmetoder for geometriske egenskaper for tilslag. *Del 4: Bestemmelse av kornform Formindeks*.
- NORSK STANDARD 2009. 13242 Tilslag for mekanisk stabiliserte og hydraulisk stabiliserte materialer til bruk i bygg- og anleggsarbeid og vegbygging. Standard Norge.
- NORSK STANDARD 2010. 1097-2 Prøvmingsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag. *Del 2: Metoder for bestemmelse av motstand mot knusing*.
- NORSK STANDARD 2011. 1097-1 Prøvmingsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag. *Del 1: Bestemmelse av motstand mot slitasje (micro-Deval)*.
- NORSK STANDARD 2012. 933-3 Prøvmingsmetoder for geometriske egenskaper for tilslag. *Del 3: Bestemmelse av kornform, Flisighetsindeks*.
- NTNU. *Hva er MROD?* [Online]. NTNU Senter for faglig kommunikasjon. Available: <https://www.ntnu.no/sekom/hva-er-imrod> [Accessed].
- NÅLSUND, R. 2014. *Railway ballast characteristics, selection criteria and performance*. 2014:259, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering.
- PERSSON, A.-L. 1998. Image analysis of shape and size of fine aggregates. *Engineering Geology*, 50, 177-186.
- PROWELL, B. D., ZHANG, J. & BROWN, E. R. 2005. *Aggregate properties and the performance of superpave-designed hot mix asphalt*, Transportation Research Board.
- RAMSAY, D., DHIR, R. & SPENCE, I. 1974. The role of rock and clast fabric in the physical performance of crushed-rock aggregate. *Engineering Geology*, 8, 267-285.
- RIGOPOULOS, I., TSIKOURAS, B., POMONIS, P. & HATZIPANAGIOTOU, K. 2013. Determination of the interrelations between the engineering parameters of construction aggregates from ophiolite complexes of Greece using factor analysis. *Construction and Building Materials*, 49, 747-757.
- RILEY, N. A. 1941. Projection sphericity. *Journal of Sedimentary Research*, 11.
- RODRIGUEZ, J., EDESKÄR, T. & KNUTSSON, S. 2013. Particle shape quantities and measurement techniques: a review. *The Electronic journal of geotechnical engineering*, 18, 169-198.
- SELMER-OLSEN, R. 1980. *Ingeniørgeologi : 1 : Generell geologi*, Trondheim, Tapir.
- SENIOR, S. & ROGERS, C. 1991. Laboratory tests for predicting coarse aggregate performance in Ontario. *Transportation Research Record*.
- SHERGOLD, F. A. 1959. *A Study of the granulators used in the production of roadmaking aggregates*.
- STATENS VEGVESEN 2014. *Håndbok N200 Vegbygging*. Vegdirektoratet.
- STATENS VEGVESEN 2016. *Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser*. Vegdirektoratet.
- STENLID, L. 1996. Klassifisering av bergarter med Los Angeles-trumma. Skanska Mellansverige AB.
- STORE NORSKE LEKSIKON 2017. Granodioritt. In: RAADE, G. (ed.).
- TANYU, B. F., YAVUZ, A. B. & ULLAH, S. 2017. A parametric study to improve suitability of micro-deval test to assess unbound base course aggregates. *Construction and Building Materials*, 147, 328-338.

- THOM, N. 1988. *Design of road foundations*. Doctor of Philosophy, University of Nottingham.
- TUTUMLUER, E. 2013. *Practices for unbound aggregate pavement layers*.
- ULVIK, A. 1994. Knuseprosedyrens innvirkning på fallprøven. Delrapport 2.
- ULVIK, A. 2012. Ringanalyser 2012. Statens vegvesen, Lab- og vegteknologiseksjonen.
- UTHUS, L. 2007. *Deformation properties of unbound granular aggregates*. 2007:92, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering.
- UTHUS, L., HOFF, I. & HORVLI, I. Evaluation of grain shape characterization methods for unbound aggregates. Paper Proceedings. 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim Norway, 2005.
- VEGDIREKTORATET 2017. Høringsutgave N200 Vegbygging. Statens vegvesen.
- VIMAN, L. & BROMS, H. 2005. *Kornform och mekaniska egenskaper hos grov ballast enligt nya Europastandarder*, VTI., VTI notat 37-2005.
- WADELL, H. 1932. Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles. *The Journal of Geology*, 40, 443-451.
- WANG, D., WANG, H., BU, Y., SCHULZE, C. & OESER, M. 2015. Evaluation of aggregate resistance to wear with Micro-Deval test in combination with aggregate imaging techniques. *Wear*, 338, 288-296.
- WU, Y., PARKER, F. & KANDHAL, P. 1998. Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 85-93.

VEDLEGG

INNHALDSFORTEGNELSE

Vedlegg A Oppgavetekst.....	87
Vedlegg B. Resultater fra førstegangsknust 0-90 mm-materiale	93
B1. Los Angeles	93
B2. Micro-Deval.....	93
B3. Flisighetsindeks	94
B4. Stenglighetsindeks	103
Vedlegg C. Optimal knusing	112
Vedlegg D. Resultater fra laboratorieknust materiale	115
D1. Los Angeles	115
D2. Micro-Deval	117
D3. Flisighetsindeks	118
D4. Stenglighetsindeks	119
Vedlegg E. Sammenheng mellom FI og SI for delfraksjonene	120
Vedlegg F. Sammenheng mellom form og styrke for førstegangsknust materiale	122
Vedlegg G. Deklarerte verdier for micro-Deval og Los Angeles.....	123
Vedlegg H. Tabulert oversikt over avvik for stavsiktene	125
H1. 2,5 mm-stavsikt	125
H2. 3,15 mm-stavsikt	126
H3. 4 mm-stavsikt	127
H4. 5 mm-stavsikt	128
H5. 6,3 mm-stavsikt	128
H6. 8 mm-stavsikt	129
H7. 10 mm-stavsikt	130
H8. 12,5 mm-stavsikt	130
H9. 16 mm-stavsikt	131
H10. 20 mm-stavsikt	131
H11. 25 mm-stavsikt	132
H12. 31,5 mm-stavsikt	132
H13. 40 mm-stavsikt	133
H14. 50 mm-stavsikt	133

VEDLEGG A. OPPGAVETEKST

MASTEROPPGAVE

(TBA4940, Veg, masteroppgave)

HØSTEN 2017

for

Nils Arne Fjeldstad Luke

Kornform og mekaniske egenskaper for et granodiorittmateriale etter testknusing og laboratorieknusing

BAKGRUNN

Statens vegvesen setter mange krav til materialene som skal brukes i norske veger. For lag med mekanisk stabiliserte materialer og for tilslag til asfaltdekker er dette krav som skal sikre at vegen har tilstrekkelig bæreevne hele året, og at vegen kan ligge i estimert levetid uten at det oppstår skadelige deformasjoner. Spesielt for lagene under dekket er dette vesentlig, da en eventuell reparasjon her er tidkrevende og kostbar både for vegeier og trafikanter. Kravene går derfor både på kornkurve for å sikre stabilitet, mekanisk styrke for å hindre nedknusing, og kornform for å fange opp svakheter som ikke alltid dekkes av de mekaniske testene. Kravene var tidligere nedfelt i vegbyggingsnormal Hb 018, som fra 2014 er erstattet av Hb N200. Noen av kravene er justert og innskjerpet over tid, men i hovedsak har de parametrene det er satt krav til og de testene som skal benyttes, vært relativt stabile lenge.

OPPGAVE

Beskrivelse av oppgaven

Denne masteroppgaven omhandler egenskaper for mekanisk stabiliserte materialer til bruk i vegoverbygninger, og betydningen ulike knuseprosesser kan ha på disse egenskapene.

Målsetting og hensikt

Et mål med oppgaven er å analysere hvordan slike prosesser påvirker kornform og resultater fra de laboratorietestene som tradisjonelt har vært brukt til å uttrykke motstand mot nedknusing. Videre skal en se på om en eventuell målt endring av knusingsmotstand kan knyttes til selve knuseprosedyren, eller om det er en eventuell endring i kornform som kan forklare slike endringer.

Deloppgaver og forskningsspørsmål

Tema for oppgaven er mekaniske og geometriske egenskaper for tilslag til ubunden bruk i vegbygging. Oppgaven skal spesielt se på kornformens innvirkning på materialets motstand mot nedknusing. Motstand mot nedknusing og abrasjon/slitasje er tradisjonelt ansett som iboende mekaniske egenskaper for et steinmateriale. Variasjoner i produksjonsmetoder for tilslag innvirker

imidlertid på materialets kornform, og tidligere forskning har påvist sammenheng mellom kornform og mekaniske egenskaper. I denne oppgaven skal tilslagsmaterialer produsert under varierende knusetekniske forhold undersøkes for å kartlegge variasjoner og sammenheng mellom produksjonsmetoder, geometriske og mekaniske egenskaper. Oppgaven skal begrenses til én geologisk forekomst, og omhandler ikke mineralogiske variasjoner i tilslagsmaterialer.

Deloppgaver:

- Litteratursøk med beskrivelse av relevante undersøkelser for geometriske og mekaniske egenskaper, samt aktuell/relevant forskning knytta til de aktuelle undersøkelsene.
- Undersøke materialenes kornform.
- Undersøke materialenes mekaniske egenskaper.
- Vurdere egnetheten til de valgte undersøkelsesmetodene, basert på resultatene og erfaring med testmetodene.
- Vurdere sammenheng mellom materialenes mekaniske egenskaper og kornform, og hvordan disse henger sammen med variasjoner i produksjonsmetoder for testmaterialet.
- Vurdere hvordan resultatene kan brukes for å oppnå bedre utnyttelse av tilslagsressurser, og hvordan dagens krav og/eller praksis i vegbygging bør endres for å oppnå dette målet.

Opgaven er en del av prosjektet "Kortreist stein", og skal utføres i samarbeid med et pågående PhD-studium som omhandler utnyttelse av knuste steinmaterialer til ubunden bruk i vegbygging.

GENERELT

Opgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidningen og selvstendigheten i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødige voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på [student ved IBM wikiside](#))
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- hovedteksten
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneholder da de samme punktene som beskrevet over, men der hovedteksten omfatter en vitenskapelig artikkel og en prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskriving ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på [student ved IBM wikiside](#)

Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Masteroppgaven regnes ikke som ferdig levert før kandidaten har levert innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i Sentralbygg II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

(Evt) Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.

Det er inngått avtale om økonomisk utgiftsdekning fra Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Det vises til avtaleteksten for de betingelsene som må være oppfylt for at avtalt beløp utbetales. Se [student ved IBM wikiside](#) for avtaleskjema.

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befarung, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/iv/adm/hms/>. Alle studenter som skal gjennomføre laboratoriearbeid i forbindelse med prosjekt- og masteroppgave skal gjennomføre et web-basert TRAINOR HMS-kurs. Påmelding på kurset skjer til kontakt@ibm.ntnu.no

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

Innleveringsfrist:

Arbeidet med oppgaven starter 10. august 2017.

Besvarelsen leveres senest ved registrering i DAIM innen 3. januar 2018 kl 23:59.

Faglærer ved instituttet: Helge Mork

Veileder (eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner: Nils Uthus, Statens vegvesen

Institutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU
Dato: 15.12.2017

Underskrift



Faglærer

VEDLEGG B. RESULTATER FRA FØRSTEGANGSKNUST 0-90 MM-MATERIALE

B1. LOS ANGELES

Prøve	Los Angeles		
	m	LA-verdi	Kommentar til LA
T4A	3590,6	28	10-12,5: 3000g, 12,5-14: 2000g
T5A	3549	29	
T6A	3721	26	
T8A	3452,3	31	
T4B	3618,1	28	
T5B	3646,5	27	
T8B	3489,6	30	
T4C	3637,5	27	
T5C	3693,2	26	
T8C	3524,8	30	

B2. MICRO-DEVAL

Prøve	Micro-Deval				
	m ₁	m ₂	M _{DE1}	M _{DE2}	MD-verdi
T4A	457,2	454,5	8,6	9,1	9
T5A	456,3	458,5	8,7	8,3	9
T6A	459,3	459,8	8,1	8,0	8
T8A	458,2	454,3	8,4	9,1	9
T4B	452,7	454,7	9,5	9,1	9
T5B	455,1	456,1	9,0	8,8	9
T8B	455,6	455,3	8,9	8,9	9
T4C	457,1	458,7	8,6	8,3	8
T5C	455,9	456,1	8,8	8,8	9
T8C	454	455,1	9,2	9,0	9

B3. FLISIGHETSINDEKS

I det følgende blir resultatene fra flisighetsindeksene for hvert enkelt materiale presentert.

Flisighetsindeks				
Materiale:	T4A			
Dato:	12.sep			
Total masse før analyse, M ₀ :	97050,2 g			
Sikterest på 100 mm-sikt:	0 g			
Gjennomgang på 4 mm-sikt:	13735,6 g			
Sum vraket materiale:	13735,6 g			
Kommentar:	Gjennomført rett etter SA.			
Fraksjon	Sikterester (R _i) på kvadratsikt	Spaltebredde stavsikt	Gjennomgang på stavsikt (m _i)	F _{li} =(m _i /R _i)*100
[mm]	[g]	[mm]	[g]	[%]
80/100	13126,7	50	615,6	4,7
63/80	21338	40	1620,5	7,6
50/63	9833,3	31,5	1556,8	15,8
40/50	7291,7	25	1357,1	18,6
31,5/40	4534	20	985,3	21,7
25/31,5	5970,2	16	1560	26,1
20/25	4205,7	12,5	1213,6	28,9
16/20	3528,6	10	939,8	26,6
12,5/16	3439,1	8	1256,9	36,5
10/12,5	2556,6	6,3	928,2	36,3
8/10	2226,7	5	892,1	40,1
6,3/8	2010,2	4	746,3	37,1
5/6,3	1664,4	3,15	1472,5	88,5
4/5	1588,7	2,5	1071,3	67,4
M ₁ =ΣR _i =	83313,9	M ₂ =Σm _i =	16216,0	
F _I =(M ₂ /M ₁)*100=	19,46			
Kontroll for massetap:	0,0 %		ok	

Flisighetsindeks				
Materiale:	T4B			
Dato:	20.sep			
Total masse før analyse, M ₀ :	138915,6 g			
Sikterest på 100 mm-sikt:	0 g			
Gjennomgang på 4 mm-sikt:	16006,9 g			
Sum vraket materiale:	16006,9 g			
Kommentar:	Gjennomført rett etter SA.			
Fraksjon	Sikterester (R _i) på kvadratsikt	Spaltebredde stavsikt	Gjennomgang på stavsikt (m _i)	Fl _i =(m _i /R _i)*100
[mm]	[g]	[mm]	[g]	[%]
80/100	16618,5	50	2272,5	13,7
63/80	30241,2	40	1404,9	4,6
50/63	18001,3	31,5	2039,3	11,3
40/50	11110,7	25	1853,7	16,7
31,5/40	10375,4	20	2484,1	23,9
25/31,5	7349,6	16	1488,2	20,2
20/25	6088,5	12,5	1326	21,8
16/20	4878,9	10	1197,2	24,5
12,5/16	4685,1	8	1436	30,7
10/12,5	3576,4	6,3	1130,2	31,6
8/10	3051,4	5	1096,3	35,9
6,3/8	2668,6	4	953	35,7
5/6,3	2092,6	3,15	1863,6	89,1
4/5	2138,4	2,5	1496,3	70,0
M ₁ =∑R _i =	122876,6	M ₂ =∑m _i =	22041,3	
FI=(M ₂ /M ₁)*100=	17,94			
Kontroll for massetap:	0,02 %		ok	

Flisighetsindeks				
Materiale:	T4C			
Dato:	24.aug			
Total masse før analyse, M ₀ :	87245,6 g			
Sikterest på 100 mm-sikt:	0 g			
Gjennomgang på 4 mm-sikt:	15897,4 g			
Sum vraket materiale:	15897,4 g			
Kommentar:				
Fraksjon	Sikterester (R _i) på kvadratsikt	Spaltebredde stavsikt	Gjennomgang på stavsikt (m _i)	F _{li} =(m _i /R _i)*100
[mm]	[g]	[mm]	[g]	[%]
80/100	7637	50	0	0,0
63/80	14359,5	40	1981,7	13,8
50/63	9581,7	31,5	1163,8	12,1
40/50	7837	25	892,4	11,4
31,5/40	4963,8	20	832	16,8
25/31,5	4275,2	16	1038,6	24,3
20/25	4107,5	12,5	917,6	22,3
16/20	3353	10	832,6	24,8
12,5/16	3535	8	1162,6	32,9
10/12,5	2723,8	6,3	748,2	27,5
8/10	2584	5	792,6	30,7
6,3/8	2370,7	4	721,5	30,4
5/6,3	1986	3,15	1728,4	87,0
4/5	1940,5	2,5	1339	69,0
M ₁ =ΣR _i =	71254,7	M ₂ =Σm _i =	14151	
FI=(M ₂ /M ₁)*100=	19,86			
Kontroll for massetap:	0,11 %		ikke ok	

Flisighetsindeks				
Materiale:		T5A		
Dato:		22.sep		
Total masse før analyse, M ₀ :		156472,1 g		
Sikterest på 100 mm-sikt:				
sikt:		0 g		
Gjennomgang på 4 mm-sikt:		12837,8 g		
Sum vraket materiale:		12837,8 g		
Gjennomført rett etter				
Kommentar: SA.				
Fraksjon	Sikterester (R _i) på kvadratsikt	Spaltebredde stavsikt	Gjennomgang på stavsikt (m _i)	Fl _i =(m _i /R _i)*100
[mm]	[g]	[mm]	[g]	[%]
80/100	33435,4	50	3293,8	9,85
63/80	39672,5	40	512,9	1,29
50/63	24033,7	31,5	3000	12,48
40/50	10485,1	25	2844,8	27,13
31,5/40	7292,7	20	2146	29,43
25/31,5	5935,6	16	2193,7	36,96
20/25	4560,6	12,5	1413,8	31,00
16/20	3953,3	10	1600,4	40,48
12,5/16	3975,2	8	1722,4	43,33
10/12,5	2834,9	6,3	1120,3	39,52
8/10	2251,5	5	981,7	43,60
6,3/8	2045	4	959,5	46,92
5/6,3	1560,7	3,15	1420,3	91,00
4/5	1532,2	2,5	1177,1	76,82
M ₁ =ΣR _i =	143568,4	M ₂ =Σm _i =	24386,7	
Fl=(M ₂ /M ₁)*100=			17,0	
Kontroll for massetap:			0,04 %	ikke ok

Flisighetsindeks				
Materiale:	T5B			
Dato:	27.sep			
Total masse før analyse, M ₀ :	120655,5 g			
Sikterest på 100 mm-sikt:	0 g			
Gjennomgang på 4 mm-sikt:	9695,4 g			
Sum vraket materiale:	9695,4 g			
Gjennomført rett etter				
Kommentar: SA.				
Fraksjon	Sikterester (R _i) på kvadratsikt	Spaltebredde stavsikt	Gjennomgang på stavsikt (m _i)	Fl _i =(m _i /R _i)*100
[mm]	[g]	[mm]	[g]	[%]
80/100	18806,1	50	832,2	4,43
63/80	32843,4	40	912,3	2,78
50/63	19829,8	31,5	2390,6	12,06
40/50	10801,7	25	1917,8	17,75
31,5/40	5934,7	20	1754	29,55
25/31,5	5253,9	16	1570,9	29,90
20/25	3502,6	12,5	1188,2	33,92
16/20	3232,7	10	1171,5	36,24
12,5/16	2907	8	1230,6	42,33
10/12,5	2013,7	6,3	836,4	41,54
8/10	1759,5	5	793,6	45,10
6,3/8	1608,4	4	716,7	44,56
5/6,3	1219,5	3,15	1118,4	91,71
4/5	1203,1	2,5	915	76,05
M ₁ =ΣR _i =	110916,1	M ₂ =Σm _i =	17348,2	
Fl=(M ₂ /M ₁)*100=	15,6			
Kontroll for massetap:	0,036 %		ikke ok	

Flisighetsindeks				
Materiale:	T5C			
Dato:	08.08.2017			
Total masse før analyse, M ₀ :	103840,8 g			
Sikterest på 100 mm-sikt:	0 g			
Gjennomgang på 4 mm-sikt:	7842 g			
Sum vraket materiale:	7842 g			
Kommentar:				
Fraksjon	Sikterester (R _i) på kvadratsikt	Spaltebredde stavsikt	Gjennomgang på stavsikt (m _i)	FI _i =(m _i /R _i)*100
[mm]	[g]	[mm]	[g]	[%]
80/100	15657,2	50	520,5	3,3
63/80	32071,9	40	1988,4	6,2
50/63	13813,3	31,5	1968,1	14,2
40/50	6306,7	25	1887,7	29,9
31,5/40	7133	20	1357,4	19,0
25/31,5	5019,3	16	1384	27,6
20/25	3294,7	12,5	1261,9	38,3
16/20	3086,5	10	1030,4	33,4
12,5/16	2756,4	8	1276,5	46,3
10/12,5	1830,9	6,3	812,9	44,4
8/10	1528,6	5	747,3	48,9
6,3/8	1302	4	602	46,2
5/6,3	1090,5	3,15	999,7	91,7
4/5	1032,3	2,5	801,1	77,6
M ₁ =ΣR _i =	95923,3	M ₂ =Σm _i =	16637,9	
FI=(M ₂ /M ₁)*100=	17,3			
Kontroll for massetap:	0,07 %		ok	

Flisighetsindeks				
Materiale:		T8A		
Dato:		04.aug		
Total masse før analyse, M ₀ :		78936,4 g		
Sikterest på 100 mm-sikt:				
sikt:		0 g		
Gjennomgang på 4 mm-sikt:		8678,8 g		
Sum vraket materiale:		8678,8 g		
Kommentar:				
Fraksjon	Sikterester (R _i) på kvadratsikt	Spaltebredde stavsikt	Gjennomgang på stavsikt (m _i)	F _{li} =(m _i /R _i)*100
[mm]	[g]	[mm]	[g]	[%]
80/100	13360,3	50	3037	22,7
63/80	16270,9	40	1485,7	9,1
50/63	12462,2	31,5	3002,1	24,1
40/50	4540,4	25	1733,5	38,2
31,5/40	5170,4	20	1507,1	29,1
25/31,5	3789,7	16	1787,1	47,2
20/25	3417,9	12,5	942,7	27,6
16/20	2603,1	10	914,2	35,1
12,5/16	2213,5	8	940,3	42,5
10/12,5	1680,8	6,3	644,3	38,3
8/10	1482,8	5	654,1	44,1
6,3/8	1319,6	4	541,8	41,1
5/6,3	1033,1	3,15	919,9	89,0
4/5	912,9	2,5	656,5	71,9
M ₁ =ΣR _i =	70257,6	M ₂ =Σm _i =	18766,3	
FI=(M ₂ /M ₁)*100=	26,7			
Massetap=	0,313 %		ikke ok	

Flisighetsindeks				
Materiale:	T8B			
Dato:	04.sep			
Total masse før analyse, M ₀ :	105858,7 g			
Sikterest på 100 mm-sikt:	0 g			
Gjennomgang på 4 mm-sikt:	11124,3 g			
Sum vraket materiale:	11124,3 g			
Kommentar:	Kjørt rett etter SA, ikke noe massetap.			
Fraksjon	Sikterester (R _i) på kvadratsikt	Spaltebredde stavsikt	Gjennomgang på stavsikt (m _i)	Fl _i =(m _i /R _i)*100
[mm]	[g]	[mm]	[g]	[%]
80/100	16776,3	50	585,5	3,49
63/80	26305	40	2421,4	9,21
50/63	11042	31,5	2259,4	20,46
40/50	10231,1	25	1629,6	15,93
31,5/40	7030,2	20	2199,2	31,28
25/31,5	4768	16	1624,5	34,07
20/25	3791,4	12,5	1275,8	33,65
16/20	3200,6	10	1182,5	36,95
12,5/16	3098,4	8	1250,6	40,36
10/12,5	2263,9	6,3	870,9	38,47
8/10	1938	5	836,4	43,16
6,3/8	1726	4	721,9	41,83
5/6,3	1315,1	3,15	1189,2	90,43
4/5	1246,5	2,5	914,3	73,35
M ₁ =ΣR _i =	94732,5	M ₂ =Σm _i =	18961,1929	
Fl=(M ₂ /M ₁)*100=	20,0			
Kontroll for massetap:	0,179 %		ikke ok	

Flisighetsindeks				
Materiale:		T8C		
Dato:		08.sep		
Total masse før analyse, M ₀ :		86644,7 g		
Sikterest på 100 mm-sikt:				
sikt:		0 g		
Gjennomgang på 4 mm-sikt:		10168 g		
Sum vraket materiale:		10168 g		
Gjennomført rett etter				
Kommentar: SA.				
Fraksjon	Sikterester (R _i) på kvadratsikt	Spaltebredde stavsikt	Gjennomgang på stavsikt (m _i)	Fl _i =(m _i /R _i)*100
[mm]	[g]	[mm]	[g]	[%]
80/100	13285,4	50	2049,9	15,43
63/80	19938,5	40	2857,9	14,33
50/63	9189,2	31,5	1786,7	19,44
40/50	6670	25	1472,8	22,08
31,5/40	5130,3	20	1719,3	33,51
25/31,5	4620,8	16	1832,3	39,65
20/25	4303	12,5	1670,1	38,81
16/20	3003,7	10	1238,8	41,24
12,5/16	2809,3	8	1348,9	48,02
10/12,5	2020,8	6,3	930,9	46,07
8/10	1720,8	5	827,5	48,09
6,3/8	1476,3	4	704,5	47,72
5/6,3	1191,7	3,15	1099,1	92,23
4/5	1114	2,5	864,9	77,64
M ₁ =ΣR _i =	76473,8	M ₂ =Σm _i =	20403,6	
FI=(M ₂ /M ₁)*100=		26,7		
Kontroll for massetap:		0,0 %		ok

B4. STENGLIGHETSINDEKS

Følgende er resultatene fra stenglighetsindeksen for hvert enkelt materiale for det førstegangsknuste materialet.

Som tidligere nevnt er T8A, T4C og T5C funnet med andre delfraksjoner, hvilket ble endret underveis i oppgaven.

Stenglighetsindeks					
Materialetype:		T8A			
Dato:		01.08.2017			
Total masse før analyse, M_0 :		70505,6 g			
NB! Etter at materiale <4mm og >90mm er fjernet.					
Materiale <4mm og >63mm:		40863,7 g			
Sikterest på 90mm-sikt:		0 g			
Gjennomgang på 4mm-sikt:		8678,8 g			
Materiale <4mm og >90mm:		8678,8 g			
Mista min. 141,4g under					
Kommentar: Sl.		Alt materiale er <90mm.			
Fraksjon d_i/D_i [mm]	Total vekt alle korn (M_{1i}) [g]	Vekt av testet fraksjon [g]	Ikke- kubiske korn (M_{2i}) [g]	$SI_i =$ (M_{2i}/M_{1i})*100 [%]	$V_i =$ (M_i/M_0)*100 [%]
4/5,6	1525	46,6	20,8	44,6	0,022
5,6/8	1797,1	197,6	96,1	48,6	0,025
8/11,2	2364,5	274,3	162,1	59,1	0,034
11,2/16	3105,3		1819	58,6	0,044
16/22,4	4538,5		2710,1	59,7	0,064
22,4/31,5	5274,1		3234,1	61,3	0,075
31,5/45	8594,9		5514,4	64,2	0,122
45/63	13580,8		6582,4	48,5	0,193
63/80	16273,6		5108,3	31,4	0,231
80/90	13368,3		1497,4	11,2	0,190
$M_1 = \sum M_{1i} =$		$M_2 = \sum M_{2i} =$		$SI = (M_2/M_1) * 100 =$	$\sum V_i =$
					0,999
					SI=
					42

Stenglighetsindeks					
Materialetype:		T8B			
Dato:		05.sep			
Total masse før analyse, M ₀ :		94691,1 g			
NB! Etter at materiale <4mm er fjernet.					
Materiale <4mm og >63mm:		54205,6 g			
Sikterest på 90mm-sikt:		0 g			
Gjennomgang på 4mm-sikt:		11124,3 g			
Materiale <4mm og >90mm:		11124,3 g			
Kommentar:					
Fraksjon	Total vekt alle korn (M ₁ /M _{1i})	Vekt av testet fraksjon	Ikke- kubiske korn (M ₂ /M _{2i})	SI _i = (M ₂ /M ₁)*100	Vi = (M _i /M ₀)*100
d _i /D _i [mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
80/100	16776,3		745,6	4,44	0,177
63/80	26305		3965,7	15,08	0,278
50/63	11042		3850,9	34,88	0,117
40/50	10231,1		4470,1	43,69	0,108
31,5/40	7028,8		4061,2	57,78	0,074
25/31,5	4756,7		2529,1	53,17	0,050
20/25	3786,2	1930,9	1080,4	55,95	0,040
16/20	3193,3	1506,7	748,4	49,67	0,034
12,5/16	3094,3	759,2	439,3	57,86	0,033
10/12,5	2260	332,5	175,4	52,75	0,024
8/10	1934,5	226,3	120,7	53,34	0,020
6,3/8	1726,2	104,1	53,8	51,68	0,018
5/6,3	1314,2	45,4	22,7	50,00	0,014
4/5	1242,5	19,3	9,1	47,15	0,013
	M ₁ =ΣM _{1i} =		M ₂ =ΣM _{2i} =	SI=(M ₂ /M ₁)*100=	ΣVi=
					1,000
				SI=	31,1

Stenglighetsindeks					
Materialetype:		T8C			
Dato:		11.sep			
Total masse før analyse, M ₀ :		76425,7 g			
NB! Etter at materiale <4mm er fjernet.					
Materiale <4mm og >63mm:		43391,9 g			
Sikterest på 90mm-sikt:		0 g			
Gjennomgang på 4mm-sikt:		10168 g			
Materiale <4mm og >90mm:		10168 g			
Kommentar:					
Fraksjon	Total vekt alle korn (M ₁ /M _{1i})	Vekt av testet fraksjon [g]	Ikke- kubiske korn (M ₂ /M _{2i}) [g]	SI _i = (M ₂ /M ₁)*100 [%]	Vi = (M _i /M ₀)*100 [%]
d _i /D _i [mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
80/100	13285,4		844,4	6,4	0,174
63/80	19938,5		7398	37,1	0,261
50/63	9189,2		3786,4	41,2	0,120
40/50	6666,6		4197,4	63,0	0,087
31,5/40	5120,9		2821,8	55,1	0,067
25/31,5	4610,7		3021,8	65,5	0,060
20/25	4296,5	2050	1285,5	62,7	0,056
16/20	2998,8	1583	980	61,9	0,039
12,5/16	2803,3	727,7	419,3	57,6	0,037
10/12,5	2015,3	446,7	284,6	63,7	0,026
8/10	1719	215,6	133,6	62,0	0,022
6,3/8	1479	86,6	46,1	53,2	0,019
5/6,3	1190,7	34,1	14,1	41,3	0,016
4/5	1111,8	17,1	8,7	50,9	0,015
M ₁ =ΣM _{1i} =		M ₂ =ΣM _{2i} =		SI=(M ₂ /M ₁)*100=	ΣVi=
					1,000
					SI=
					42,4

Stenglighetsindeks					
Materialetype:		T5A			
Dato:		25.sep			
Total masse før analyse, M_0 :		143562,9 g			
NB! Etter at materiale <4mm er fjernet.					
Materiale <4mm og >63mm:		85961,9 g			
Sikterest på 90mm-sikt:		0 g			
Gjennomgang på 4mm-sikt:		12837,8 g			
Materiale <4mm og >90mm:		12837,8 g			
Kommentar: Ikke splittet, stor prøve.					
Fraksjon	Total vekt alle korn (M_1/M_{1i})	Vekt av testet fraksjon [g]	Ikke- kubiske korn (M_2/M_{2i}) [g]	$SI_i =$ (M_2/M_1)*100 [%]	$Vi =$ (M_i/M_0)*100 [%]
d_i/D_i [mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
80/100	33451,6		656,8	2,0	0,233
63/80	39672,5		3493,7	8,8	0,276
50/63	24033,7		6988	29,1	0,167
40/50	10484,1		4546,8	43,4	0,073
31,5/40	7291,2		4175,3	57,3	0,051
25/31,5	5929,6		3769,1	63,6	0,041
20/25	4558,4	2349,7	1484,3	63,2	0,032
16/20	3947,3	1870,7	1125,5	60,2	0,027
12,5/16	3973,9	989,7	644,3	65,1	0,028
10/12,5	2833,6	344,7	237,9	69,0	0,020
8/10	2250,5	151,8	91,5	60,3	0,016
6,3/8	2045	123,6	64,5	52,2	0,014
5/6,3	1559,5	50	24,7	49,4	0,011
4/5	1532	28,3	13,4	47,3	0,011
	$M_1 = \sum M_{1i} =$		$M_2 = \sum M_{2i} =$	$SI = (M_2/M_1) * 100 =$	$\sum Vi =$
					1,000
				SI=	26,0

Stenglighetsindeks					
Materialetype:		T5B			
Dato:		27.sep			
Total masse før analyse, M ₀ :		110908,2 g			
NB! Etter at materiale <4mm er fjernet.					
Materiale <4mm og >63mm:		g			
Sikterest på 90mm-sikt:		0 g			
Gjennomgang på 4mm-sikt:		9695,4 g			
Materiale <4mm og >90mm:		9695,4 g			
Kommentar: Ikke splittet, stor prøve.					
Fraksjon	Total vekt alle korn (M ₁ /M _{1i})	Vekt av testet fraksjon [g]	Ikke- kubiske korn (M ₂ /M _{2i}) [g]	SI _i = (M ₂ /M ₁)*100 [%]	Vi = (M _i /M ₀)*100 [%]
d _i /D _i [mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
80/100	18812,9		0	0,0	0,170
63/80	32843,4		737,9	2,2	0,296
50/63	19829,8		3728,1	18,8	0,179
40/50	10797,1		4858,2	45,0	0,097
31,5/40	5933,5		2867,5	48,3	0,053
25/31,5	5250,9		2892,2	55,1	0,047
20/25	3501,3	1803,6	1020,5	56,6	0,032
16/20	3230,7	1686,1	918,4	54,5	0,029
12,5/16	2906,9	799,2	480,3	60,1	0,026
10/12,5	2012,3	246,1	149,7	60,8	0,018
8/10	1758,9	209,8	127,3	60,7	0,016
6,3/8	1608,8	101,3	56,6	55,9	0,015
5/6,3	1219,1	41,9	20,2	48,2	0,011
4/5	1202,6	18,5	10,8	58,4	0,011
M ₁ =ΣM _{1i} =		M ₂ =ΣM _{2i} =		SI=(M ₂ /M ₁)*100=	ΣVi=
					1,000
					SI=
					22,6

Stenglighetsindeks						
Materialetype:		T5C				
Dato:		09.08.2017				
Total masse før analyse, M_0 :		95998,8 g				
NB! Etter at materiale <4mm er fjernet.						
Materiale <4mm og >63mm:		55579,9 g				
Sikterest på 90mm-sikt:		0 g				
Gjennomgang på 4mm-sikt:		7842,0 g				
Materiale <4mm og >90mm:		7842 g				
Kommentar:						
Fraksjon	Total vekt alle korn (M_1/M_{1i})	Vekt av testet fraksjon [g]	Ikke- kubiske korn (M_2/M_{2i}) [g]	$SI_i =$ (M_2/M_1)*100 [%]	$Vi =$ (M_i/M_0)*100	
d_i/D_i [mm]	[g]	[g]	[g]	[%]		
4/5,6	1609,3	47,6	25,9	54,4	0,017	
5,6/8	1880,2	127,5	68,1	53,4	0,020	
8/11,2	2425,2	153,1	89,7	58,6	0,025	
11,2/16	3669,1	778,4	460,3	59,1	0,038	
16/22,4	4964,5	2460	1493,4	60,7	0,052	
22,4/31,5	6434		3306	51,4	0,067	
31,5/45	11024,6		4352,8	39,5	0,115	
45/63	16158,8		4593,8	28,4	0,168	
63/80	32071,9		3623,8	11,3	0,334	
80/90	15666		523,7	3,3	0,163	
$M_1 = \sum M_{1i} =$		$M_2 = \sum M_{2i} =$		$SI = (M_2/M_1) * 100 =$	$\sum Vi =$	
					0,999	
					SI =	
					25,9	

Stenglighetsindeks					
Materialetype:		T4A			
Dato:		14.sep			
Total masse før analyse, M ₀ :		83260,5 g			
NB! Etter at materiale <4mm er fjernet.					
Materiale <4mm og >63mm:		48200,3 g			
Sikterest på 90mm-sikt:		0 g			
Gjennomgang på 4mm-sikt:		13735,6 g			
Materiale <4mm og >90mm:		13735,6 g			
Kommentar:					
Fraksjon	Total vekt alle korn (M ₁ /M _{1i})	Vekt av testet fraksjon	Ikke- kubiske korn (M ₂ /M _{2i})	SI _i = (M ₂ /M ₁)*100	Vi = (M _i /M ₀)*100
d _i /D _i [mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
80/100	13126,7		0	0,0	0,158
63/80	21338		1880,9	8,8	0,256
50/63	9833,3		2099,6	21,4	0,118
40/50	7291,7		2395,7	32,9	0,088
31,5/40	4527,4		1748,8	38,6	0,054
25/31,5	5960,9		3408,8	57,2	0,072
20/25	4200,9	2176,7	1100,1	50,5	0,050
16/20	3523,5	853,7	425,2	49,8	0,042
12,5/16	3431,5	752,3	376,8	50,1	0,041
10/12,5	2550,6	338,5	173,6	51,3	0,031
8/10	2219,3	133,8	68,4	51,1	0,027
6,3/8	2010,2	73,3	26,6	36,3	0,024
5/6,3	1661,3	23,2	10,5	45,3	0,020
4/5	1585,2	22,8	8,7	38,2	0,019
	M ₁ =ΣM _{1i} = 83260,5		M ₂ =ΣM _{2i} = 13723,7	SI=(M ₂ /M ₁)*100=	ΣVi= 1,00000
				SI=	26,0

Stenglighetsindeks					
Materialetype:		T4B			
Dato:		20.sep			
Total masse før analyse, M ₀ :		122713,7 g			
NB! Etter at materiale <4mm er fjernet.					
Materiale <4mm og >63mm:		62873,7 g			
Sikterest på 90mm-sikt:		0 g			
Gjennomgang på 4mm-sikt:		16006,9 g			
Materiale <4mm og >90mm:		16006,9 g			
Kommentar:					
Fraksjon	Total vekt alle korn (M ₁ /M _{1i})	Vekt av testet fraksjon	Ikke- kubiske korn (M ₂ /M _{2i})	SI _i = (M ₂ /M ₁)*100	Vi = (M _i /M ₀)*100
d _i /D _i [mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
80/100	16625,6		0	0,0	0,135
63/80	30241,2		3109,7	10,3	0,246
50/63	17887,3		6282,8	35,1	0,146
40/50	11106,4		3381,2	30,4	0,091
31,5/40	10359,8		3979,6	38,4	0,084
25/31,5	7335,7	3417,7	1273,3	37,3	0,060
20/25	6081,7	3362	1496,4	44,5	0,050
16/20	4876,4	1056,3	484,7	45,9	0,040
12,5/16	4683,7	590,6	330,9	56,0	0,038
10/12,5	3574,5	207,7	98,4	47,4	0,029
8/10	3046,1	194,2	79,1	40,7	0,025
6,3/8	2668,8	80,7	31,3	38,8	0,022
5/6,3	2090,5	34,1	12,4	36,4	0,017
4/5	2136	17,6	6,8	38,6	0,017
	M ₁ =ΣM _{1i} = 122713,7		M ₂ =ΣM _{2i} = 20566,6	SI=(M ₂ /M ₁)*100=	ΣVi= 1,00
				SI=	26,6

Stenglighetsindeks					
Materialetype:	T4C				
Dato:	24.aug				
Total masse før analyse, M_0 :	71348,2 g				
NB! Etter at materiale <4mm er fjernet.					
Materiale <4mm og >63mm:	37893,9 g				
Sikterest på 90mm-sikt:	0 g				
Gjennomgang på 4mm-sikt:	15897,4 g				
Materiale <4mm og >90mm:	15897,4 g				
Kommentar:					
Fraksjon	Total vekt alle korn (M_1/M_{1i})	Vekt av testet fraksjon [g]	Ikke- kubiske korn (M_2/M_{2i}) [g]	$SI_i =$ (M_2/M_1)*100 [%]	$Vi =$ (M_i/M_0)*100
d_i/D_i [mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	
80/90	7637		978,2	12,8	0,107
63/80	14359,5		3067,2	21,4	0,201
45/63	13506,6		3274,2	24,2	0,189
31,5/45	8798,5		3698,2	42,0	0,123
22,4/31,5	5919,5		2369	40,0	0,083
16/22,4	5801,7	1452,1	631,8	43,5	0,081
11,2/16	4840,9	590,3	273	46,2	0,068
8/11,2	3986,3	224,4	75,9	33,8	0,056
5,6/8	3459,4	63,2	27,7	43,8	0,048
4/5,6	2917	25,5	6,9	27,1	0,041
	$M_1 = \sum M_{1i} =$		$M_2 = \sum M_{2i} =$	$SI = (M_2/M_1) * 100 =$	$\sum Vi =$
					0,998
				SI =	30,61

VEDLEGG C. OPTIMAL KNUSING

Knuserens åpning måtte stilles inn på nytt som følge av bytte av knuserplater. Optimal knusing er vektlagt, hvilket innebærer at mest materiale knuses ned til testfraksjonen 10-14 mm. Litteraturen tilsier da at disse fraksjonene skal oppnå best kornform.

Det ble først benyttet et referansemateriale, Lia, for å bestemme optimal knuseråpning. Siden ble det kontrollert at også testmaterialet ga optimal knusing.

Skjemaet er utarbeidet ved Sentrallaboratoriet.

Kontroll av knuseren - enkel sikteanalyse

Dato : 15.11.17	Kontroll Materiale: Lia	Signatur: NL
------------------------	------------------------------------------	---------------------

(for materiale som skal benyttes til Los Angeles og micro-Deval)

Knusemengde: ca. 30 kg
(innveid 29,5 kg)

Knuser justert til 11 mm åpning

Sikt i mm	Behov	Vekt i gram	Vekt i %
16.0		2492,7	8,4
14.0		2624,2	8,9
12.5	LA > 1750 g	2856,5	9,7
	M _{DE} > 350 g		
10.0	LA > 3250 g	6091,7	20,6
	M _{DE} > 650 g		
8.0		3259,0	11,0
4.0		4986,5	16,9
Bunn		7209,6	24,4
Total vekt		29520,2	100,0

Materiale < 10 mm og > 14 mm kan kastes etter at det er veid opp.

Knuser var innstilt på 11 mm åpning.

Ikke registrert forskyvning.

Region midt
Laboratoriet
Molde/Sentrallaboratoriet
 Arbeidsskjema for
 laboratorieanalyser

Kontroll av knuseren - enkel sikteanalyse

Dato : 16/11-2017	Materiale: Kortreist Stein, T8C	Signatur: NL
--------------------------	----------------------------------------	---------------------

(for materiale som skal benyttes til Los Angeles og micro-Deval)

Knusemengde: ca. 35 kg -
knuser justert til 11 mm åpning

Sikt i mm	Behov	Vekt i gram	Vekt i %
22.4		78,6	0,2
16.0		1933,7	5,6
14.0		2671,9	7,7
12.5	LA > 1750 g	3309,3	9,5
	M _{DE} > 350 g		
10.0	LA > 3250 g	7326,4	21,1
	M _{DE} > 650 g		
8.0		4340,0	12,5
4.0		5971,0	17,2
Bunn		9107,0	26,2
Total vekt		34737,9	100,0

Materiale < 10 mm og > 14 mm kan kastes etter at det er veid opp.

VEDLEGG D. RESULTATER FRA LABORATORIEKNUST MATERIALE

I det følgende vil resultatene fra det laboratorieknuste materialet presenteres. Dette inkluderer Los Angeles, micro-Deval, flisighetsindeks og stenglighetsindeks.

D1. LOS ANGELES

Los Angeles										
Materiale	M ₂ , initiell vekt [g]	m _{10g} [g], >10 mm	m _{1,6g} [g], 1,6-10mm	<m _{1,6g}	Tapt materiale [g]	m=m _{10g} +m _{1,6g} [g]	LA=(5000-m)/50	LAr=(m _{10g} /M ₂)*100	LAr=100%-LAr	Dato
T4A	4999,8	1125	2780,1	1079,2	15,5	3905,1	21,9	22,5	77,5	27.11.2017
T4B	5002,2	1176,1	2775,5	1034,1	16,5	3951,6	21,0	23,5	76,5	28.11.2017
T4C	5000,5	1308,9	2678	993,2	20,4	3986,9	20,3	26,2	73,8	29.11.2017
T5A	4999,8	1269,5	2729	985,8	15,5	3998,5	20,0	25,4	74,6	24.11.2017
T5B	5000,1	1503,6	2590,1	888,6	17,8	4093,7	18,1	30,1	69,9	24.11.2017
T5C	4999,9	1424,3	2640,7	918,3	16,6	4065	18,7	28,5	71,5	28.11.2017
T8A	5000,7	1250,9	2734,7	997,5	17,6	3985,6	20,3	25,0	75,0	29.11.2017
T8B	5000,6	1238,6	2702,3	1046,4	13,3	3940,9	21,2	24,8	75,2	22.11.2017
T8C	5001	1352,1	2648,2	982,9	17,8	4000,3	20,0	27,0	73,0	22.11.2017

D2. MICRO-DEVAL

micro-Deval													
Materiale	m _{10,1} [g]	m _{10,2} [g]	M _{2,1} , Initiell vekt [g]	M _{2,2} , Initiell vekt [g]	MDr ₁ =m ₁ , 10/M2	MDr ₂ =m ₂ , 10/M2	MDr (snitt) [%]	MDx=100%- MDr [%]	m ₁	m ₂	M _{DE1}	M _{DE2}	MD- verdi
T4A	372,1	362	499,8	500,1	74,4	72,4	73,4	26,6	461,2	461,6	7,76	7,68	7,72
T4B	381,5	372,6	500	499,9	76,3	74,5	75,4	24,6	463,7	461,6	7,26	7,68	7,47
T4C	392,7	402,9	500	499,9	78,5	80,6	79,6	20,4	465,8	464,5	6,84	7,10	6,97
T5A	411,1	379	500,3	500	82,2	75,8	79,0	21,0	468,2	468	6,36	6,40	6,38
T5B	372,6	365,7	500,2	499,9	74,5	73,2	73,8	26,2	460,8	460,3	7,84	7,94	7,89
T5C	385,2	395,2	499,8	500,2	77,1	79,0	78,0	22,0	464,9	465,3	7,02	6,94	6,98
T8A	416,9	393	499,8	500	83,4	78,6	81,0	19,0	463,6	461,6	7,28	7,68	7,48
T8B	377,4	362,1	499,7	500,5	75,5	72,3	73,9	26,1	463,6	464,8	7,28	7,04	7,16
T8C	408,5	384,7	499,8	500,7	81,7	76,8	79,3	20,7	469,7	469,7	6,06	6,06	6,06

D3. FLISIGHETSINDEKS

Flisighetsindeksen er funnet for delfraksjonene 10-12,5 mm og 12,5-16 mm for det laboratoriekunste materialet.

Flisighetsindeks 80/100 mm						
Materiale	Fraksjon [mm]	Sikterester (R _i) på kvadratsikt [g]	Spaltebredde stavsikt [mm]	Gjennomgang på stavsikt (m _i) [g]	Fl _i =(m _i /R _i)*100 [%]	Fl=(M ₂ /M ₁)*100 [%]
T4A	12,5/16	5207,8	8	699,5	13,4	
	10/12,5	6741,3	6,3	420,8	6,2	
	M ₁ =ΣR _i =	11949,1	M ₂ =Σm _i =	1120,3		9,4
T4B	12,5/16	5302,1	8	661,8	12,5	
	10/12,5	6599,4	6,3	448,9	6,8	
	M ₁ =ΣR _i =	11901,5	M ₂ =Σm _i =	1110,7		9,3
T4C	12,5/16	5349,4		740,3	13,8	
	10/12,5	6687,1		476,5	7,1	
	M ₁ =ΣR _i =	12036,5	M ₂ =Σm _i =	1216,8		10,1
T5A	12,5/16	5325,8	8	727,4	13,7	
	10/12,5	6726,3	6,3	496,6	7,4	
	M ₁ =ΣR _i =	12052,1	M ₂ =Σm _i =	1224		10,2
T5B	12,5/16	5542,3	8	740,4	13,4	
	10/12,5	6983,7	6,3	548,8	7,9	
	M ₁ =ΣR _i =	12526	M ₂ =Σm _i =	1289,2		10,3
T5C	12,5/16	5853,5	8	759,3	13,0	
	10/12,5	6913,3	6,3	555,3	8,0	
	M ₁ =ΣR _i =	12766,8	M ₂ =Σm _i =	1314,6		10,3
T8A	12,5/16	5436,5	8	691,1	12,7	
	10/12,5	7203,3	6,3	519,8	7,2	
	M ₁ =ΣR _i =	12639,8	M ₂ =Σm _i =	1210,9		9,6
T8B	12,5/16	4862,5	8	617,3	12,7	
	10/12,5	6909,2	6,3	435,1	6,3	
	M ₁ =ΣR _i =	11771,7	M ₂ =Σm _i =	1052,4		8,9
T8C	12,5/16	5981,2	8	769,5	12,9	
	10/12,5	7326,4	6,3	503,7	6,9	
	M ₁ =ΣR _i =	13307,6	M ₂ =Σm _i =	1273,2		9,6

D4. STENGLIGHETSINDEKS

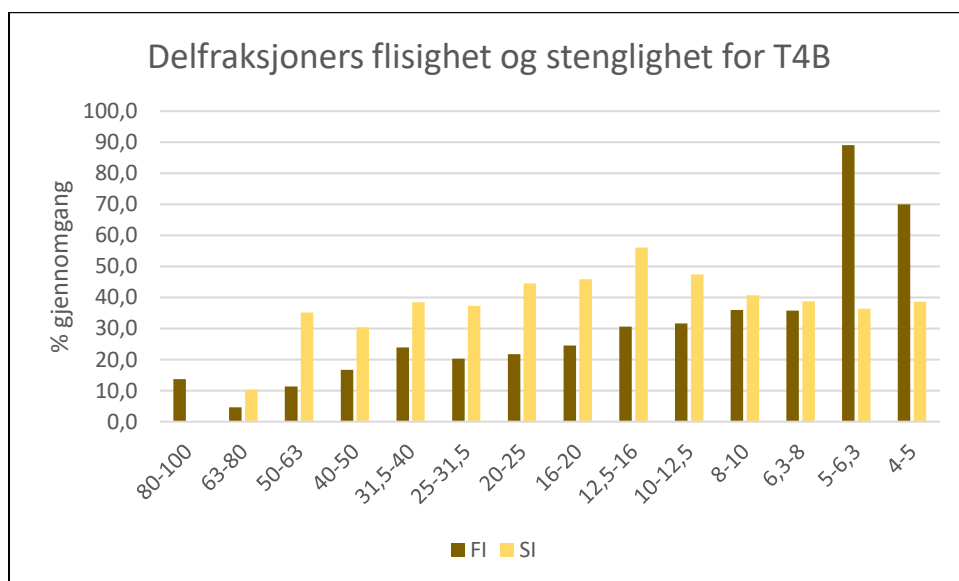
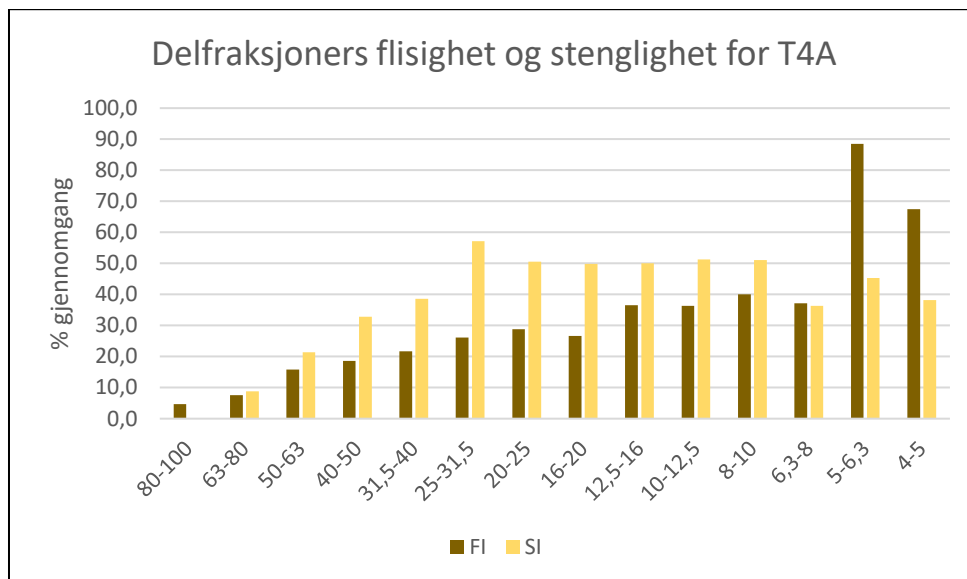
Stenglighetsindeksen er også funnet for delfraksjonene 10-12,5 mm og 12,5-16 mm for det laboratorieknuste materialet.

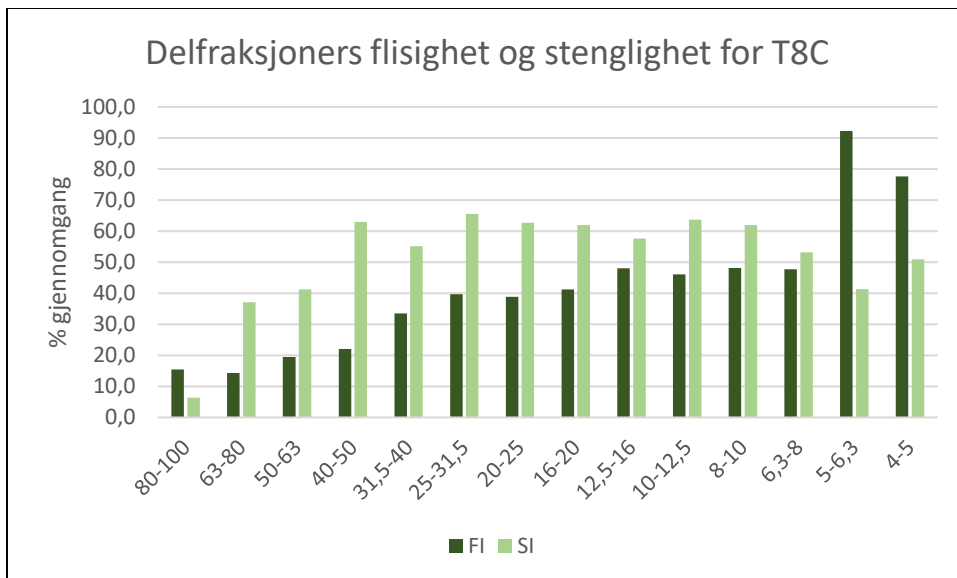
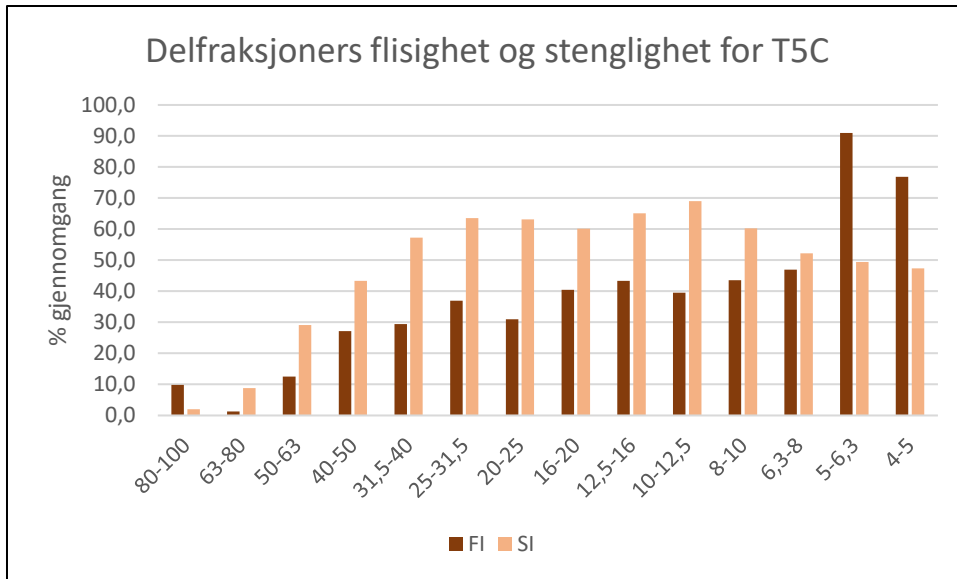
Stenglighetsindeks 10/16 mm								
Materiale	Fraksjon [mm]	Total vekt alle korn (M1/M1i) [g]	Antall ganger splittet	Vekt av testet fraksjon [g]	Ikke- kubiske korn (M2/M2i) [g]	Sli = (M2/M1)*100	Vi = (Mi/M0)*100	SI [%]
T4A	12,5/16	5207	3	693	100,7	14,53	0,44	
	10/12,5	6740,5	5	252,2	18,6	7,38	0,56	10,5
T4B	12,5/16	5301,3	3	671,3	55,4	8,25	0,45	
	10/12,5	6595,5	4	410,4	32,1	7,82	0,55	8,0
T4C	12,5/16	5348,6	3	668,1	97	14,52	0,44	
	10/12,5	6686,1	4	390,3	27,7	7,10	0,56	10,4
T5A	12,5/16	5315,1	3	661,9	95,2	14,38	0,44	
	10/12,5	6710,6	4	387,2	23,1	5,97	0,56	9,7
T5B	12,5/16	5542,3	3	722,2	80,5	11,15	0,44	
	10/12,5	6983,7	5	233,9	18,5	7,91	0,56	9,3
T5C	12,5/16	5852,8	3	757,2	62,3	8,23	0,46	
	10/12,5	6912,5	5	221,5	34,2	15,44	0,54	12,1
T8A	12,5/16	5435,4	3	732,4	67,8	9,26	0,43	
	10/12,5	7199,7	5	231,5	12,4	5,36	0,57	7,0
T8B	12,5/16	4850,7	3	618,7	47,4	7,66	0,41	
	10/12,5	6897,1	5	237,3	11,6	4,89	0,54	5,8
T8C	12,5/16	5971,1	3	727,2	55	7,56	0,45	
	10/12,5	7312	5	240,1	24,4	10,16	0,55	9,0

VEDLEGG E. SAMMENHENG MELLOM FI OG SI FOR DELFRAKSJONENE

Det er i rapporten kun inkludert sammenhengen mellom flisighetsindeksen og stenglighetsindeksen for det førstegangsknuste materialet for to av ni prøver (T5B og T8B). Her inkluderes tilsvarende sammenheng for prøvene T4A, T4B, T5A og T8C.

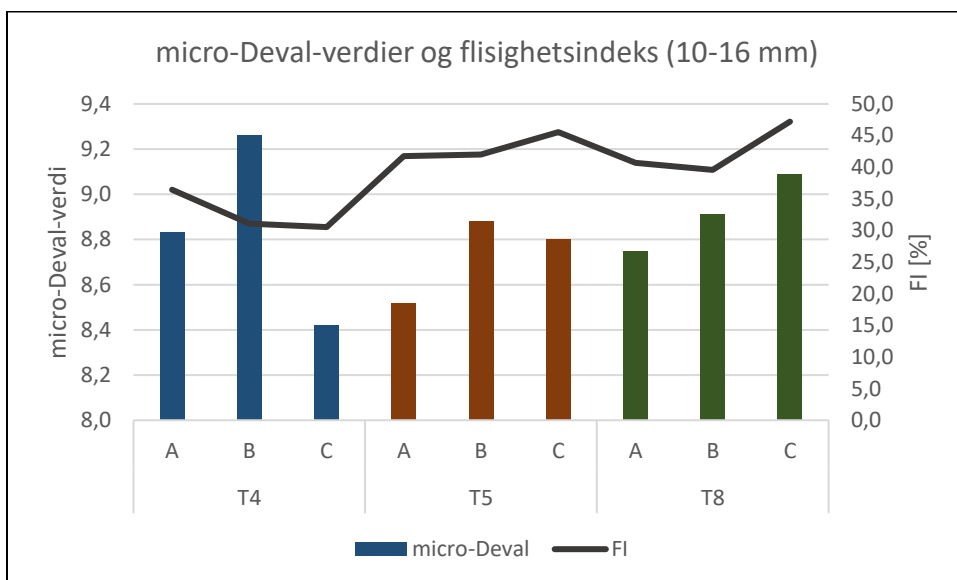
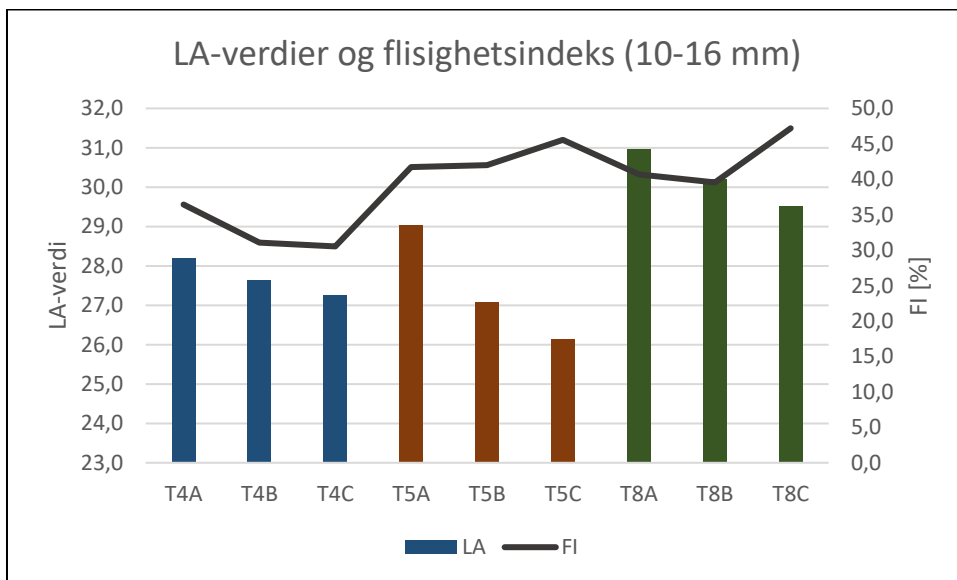
Resterende prøver er ikke testet for korrelerende delfraksjoner og er derfor ikke inkludert.






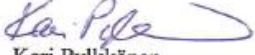

VEDLEGG F. SAMMENHENG MELLOM FORM OG STYRKE FOR FØRSTEGANGSKNUST MATERIALE

Sammenhengen mellom stenglighetsindeks og de styrkemessige parametrene LA-og micro-Deval-verdiene er fremstilt i rapporten. Her inkluderes derfor sammenhengen mellom flisighetsindeks og resultatene fra henholdsvis Los Angeles og micro-Deval for det førstegangsknuste materialet. Det er, som tidligere nevnt, ingen sammenheng å spore.



VEDLEGG G. DEKLARERTE VERDIER FOR MICRO-DEVAL OG LOS ANGELES

Følgende vedlegg er på finsk, men de deklarererte LA- og micro-Deval-verdiene kommer likevel frem av skjermdumpene. Disse er på 26 for Los Angeles og 9 for micro-Deval.

 TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO Maa- ja pohjarakenteet		TESTAUSSELOSTUS MPR/91/2016 1(1) 09-06-2016																	
Ritva Kuisma, puh. 040-849 0302 Rudus Oy Juho Auranen Tilauksenne 16.5.2016 KIVIAINESTUTKIMUKSET																			
Näytteet	1 kpl, KaM 0/16 mm, Nokia (TTY:n työnumero MPR/91/2016). Näytteen on ottanut Kimmo Pitkänen 11.5.2016 ja toimittanut sen TTY:lle 16.5.2016. Näytteenotto ja näytteen edustavuus on tilaajan vastuulla.																		
Näytteiden esikäsittely	Laboratorionäytteestä seulottiin ja jaettiin testinäytteet eri määrittämissä varten.																		
Testausmenetelmät	Kiintotiheys ja vedenimeytyminen määritettiin standardin SFS-EN 1097-6/2014 kohtien 8 ja 9 mukaisesti. Los Angeles-luku määritettiin standardin SFS-EN 1097-2:2010 mukaisesti.																		
Tulokset	Tulokset on esitetty oheisissa taulukoissa. Testi tehtiin Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä 16.5. – 2.6.2016 välisenä aikana. <i>Taulukko 1. KaM 0/16 mm, Nokia.</i>																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>NÄYTE</th> <th>KIINTO-TIHEYS (Mg/m³) näennäinen ρ_a</th> <th>KIINTO-TIHEYS (Mg/m³) uunikuiva ρ_{ud}</th> <th>KIINTO-TIHEYS (Mg/m³) pintakuiva ρ_{pid}</th> <th>VEDEN-IMUKYKY (%) $W_{A_{24}}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>KaM 0,063/4mm (996,3 g, kohta 9)</td> <td>2,71</td> <td>2,71</td> <td>2,71</td> <td>0,1</td> </tr> <tr> <td>KaS 4/16 mm (2156,8 g kohta 8)</td> <td>2,72</td> <td>2,71</td> <td>2,71</td> <td>0,2</td> </tr> </tbody> </table>				NÄYTE	KIINTO-TIHEYS (Mg/m ³) näennäinen ρ_a	KIINTO-TIHEYS (Mg/m ³) uunikuiva ρ_{ud}	KIINTO-TIHEYS (Mg/m ³) pintakuiva ρ_{pid}	VEDEN-IMUKYKY (%) $W_{A_{24}}$	KaM 0,063/4mm (996,3 g, kohta 9)	2,71	2,71	2,71	0,1	KaS 4/16 mm (2156,8 g kohta 8)	2,72	2,71	2,71	0,2
NÄYTE	KIINTO-TIHEYS (Mg/m ³) näennäinen ρ_a	KIINTO-TIHEYS (Mg/m ³) uunikuiva ρ_{ud}	KIINTO-TIHEYS (Mg/m ³) pintakuiva ρ_{pid}	VEDEN-IMUKYKY (%) $W_{A_{24}}$															
KaM 0,063/4mm (996,3 g, kohta 9)	2,71	2,71	2,71	0,1															
KaS 4/16 mm (2156,8 g kohta 8)	2,72	2,71	2,71	0,2															
	Lajitteiden prosentuaalinen osuus: < 4mm 62 % ja > 4 mm 38 %																		
	<i>Taulukko 2. KaM 0/16 mm, Nokia.</i> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Los Angeles-luku</th> <th>LA</th> <th>26</th> </tr> </thead> </table>				Los Angeles-luku	LA	26												
Los Angeles-luku	LA	26																	
	Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.																		
	Projektipäällikkö	 Kari Pyökkänen																	
	Laboratoriomestari	 Ritva Kuisma																	
JAKELU:	Asiakas TTY																		
Postiosoite PL 600 33101 Tampere	Käyntiosoite Korkeakoulunkatu 5 33720 Tampere	Vaihde 03-3115 111																	
Tulostettu 9.6.2016	PANK-hyväksytty testausorganisaatio																		



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Maa- ja pohjarakenteet

TESTAUSSELOSTUS MPR/77/2017

I(1)

Tero Porkka, puh. 050-447 9155

10-04-2017

Metso Minerals
Ville Viberg

Tilauksenne 29.3.2017

KIVIAINESTUTKIMUKSET

- Näytteet** 1 kpl, KaS 10/16 mm, Nokia (TTY:n työnnumero MPR/77/2017). Näyte on toimitettu TTY:lle 29.3.2017. Näytteenotto ja näytteen edustavuus on tilaajan vastuulla.
- Näytteiden esikäsittely** Laboratorionäytteestä seulottiin testinäytteet Micro-Deval arvon määrittystä varten.
- Testausmenetelmät** Micro-Deval arvo määritettiin standardin SFS-EN 1097-1:en:2011 mukaisesti.
- Tulokset** Tulokset on esitetty oheisessa taulukossa. Testit tehtiin Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä 3. – 7.4.2017 välisenä aikana.

Taulukko 1. KaS 10/16 mm.

Micro-Deval	M _{DE}	9
--------------------	-----------------	---

Micro-Deval-testissä määritettiin Micro-Deval arvo kahdelle rinnakkaisnäytteelle. Yksittäisten näytteiden arvoiksi saatiin 9,0 ja 9,1. Taulukossa esitetty arvo M_{DE} on näiden keskiarvo pyöristettynä lähimpään kokonaislukuun.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Projektipäällikkö


Kari Pyökkänen

Laboratoriomestari


Tero Porkka

JAKELU:

Asiakas
TTY

Postiosoite
PL 600, 33101 Tampere

Käyntiosoite
Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere

Vaihde
03-3115 111

Tulostettu 10.4.2017

PANK-hyväksytty testausorganisaatio

VEDLEGG H. TABULERT OVERSIKT OVER AVVIK FOR STAVSIKTENE

Arnhild Ulvik ved Sentrallaboratoriet har foretatt målinger over omfanget av avviket ved stavsiktene som ble kjøpt inn i forbindelse med Kortreist-stein-prosjektet. I det følgende vil målinger av samtlige sikt presenteres, fra 2,5 mm og oppover til 50 mm.

H1. 2,5 MM-STAVSIKT

- 161 målte verdier.
- Kun 4 innenfor toleransen.
- 138 av målingene ligger over øvre toleransegrense.
- Gjennomsnittsverdi: 3,01 mm

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
2,5 mm	3,03	2,95	2,91	3,45	2,82	2,78	3,17	3,15	0,95	±0,11
2,5 mm	2,94	2,85	3,48	2,32	3,38	3,07	3,04	2,88	0,98	
2,5 mm	2,88	3,26	2,81	3,10	3,03	3,06	2,87	3,24	0,76	
2,5 mm	2,94	2,76	2,74	3,09	2,97	3,31	2,94	2,99	0,81	
2,5 mm	3,23	3,31	2,77	3,12	3,26	3,01	3,06		0,81	
2,5 mm	3,07	3,25	2,77	2,88	3,13	2,85	3,15	3,07	0,75	
2,5 mm	2,71	2,97	3,88	2,74	3,23	3,32	3,68	3,34	1,38	
2,5 mm	3,09	2,77	3,23	2,89	3,07	2,60	3,35	2,50	0,85	
2,5 mm	3,49	3,00	2,79	3,21	2,76	2,85	3,01	2,98	0,99	
2,5 mm	3,06	3,08	3,03	2,98	2,97	2,99	3,02	2,60	0,58	
2,5 mm	2,67	3,24	3,28	2,84	3,11	2,89	2,96	3,05	0,78	
2,5 mm	3,02	2,81	3,15	2,97	2,91	3,01	2,95	2,91	0,65	
2,5 mm	2,95	3,20	3,21	3,12	2,96	2,98	2,93	2,59	0,71	
2,5 mm	3,01	2,87	3,08	3,09	2,89	3,03	3,09	3,32	0,82	
2,5 mm	3,29	2,24	3,25	3,09	2,79	3,18	2,81	2,80	0,79	
2,5 mm	3,24	2,74	3,09	3,09	2,89	2,92	2,91	3,21	0,74	
2,5 mm	2,96	2,13	3,20	3,39	3,33	2,99	2,93	3,08	0,89	
2,5 mm	2,89	3,12	2,90	3,40					0,90	
2,5 mm	2,95	2,85	3,13	2,82	3,02	2,97	3,15	3,26	0,76	
2,5 mm	2,26	3,28	2,86	2,93	2,95	3,06	3,01	2,96	0,78	
2,5 mm	3,04	2,90	2,76	3,20	3,46	2,86			0,96	

H2. 3,15 MM-STAVSIKT

- 182 målte verdier.
- Kun 10 verdier innenfor toleransen.
- 168 av målingene ligger over øvre toleransegrense.
- Gjennomsnittsverdi: 3,88 mm

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
3,15 mm	4,03	3,92	3,54	3,49	3,55	3,49	3,06	4,41	1,26	±0,11
3,15 mm	3,07	3,77	4,43	3,69	3,81	3,85	3,77	4,02	1,28	
3,15 mm	3,43	3,62	4,45	3,73	4,18	3,55	3,97	3,70	1,30	
3,15 mm	3,39	4,01	4,19	3,68	3,95	3,67	3,98	3,78	1,04	
3,15 mm	3,69	3,82	3,76	4,16	4,13	3,23	3,79	3,95	1,01	
3,15 mm	3,69	4,01	3,73	4,41	3,84	3,37	3,60	4,10	1,26	
3,15 mm	3,72	4,03	3,73	4,36	3,77	3,18	4,08	3,41	1,21	
3,15 mm	3,91	3,93	3,85	3,69	3,85	4,23			1,08	
3,15 mm	3,63	3,91	4,04	3,53	4,16	4,67	3,05	4,02	1,52	
3,15 mm	3,87	3,70	4,08	3,91	4,19	3,57	3,96	4,92	1,77	
3,15 mm	2,92	4,62	3,16	3,83	3,84	3,99	3,59	4,76	1,61	
3,15 mm	2,50	4,49	3,72	3,87	3,75	3,84	3,72		1,34	
3,15 mm	3,86	3,90	3,99	3,90	4,03	3,83	4,30	3,49	1,15	
3,15 mm	3,79	3,79	4,11	3,75	4,48	3,59	4,66	3,14	1,51	
3,15 mm	3,82	4,25	4,17	3,56	3,84	3,95	3,78	4,58	1,43	
3,15 mm	2,97	4,47	4,09	3,84	3,67	3,91	4,04		1,32	
3,15 mm	3,90	3,68	4,24	3,80	4,71	4,23	3,09	4,01	1,56	
3,15 mm	3,94	3,82	3,90	4,26	3,24	4,59	3,58	4,25	1,44	
3,15 mm	3,76	4,24	3,92	3,46	3,81	4,24	3,79	4,06	1,09	
3,15 mm	3,94	3,87	3,83	4,34					1,19	
3,15 mm	3,99	3,97	3,70	4,12	3,65	4,44	2,66	4,70	1,55	
3,15 mm	3,26	3,85	4,28	3,75	3,41	4,63	3,91	4,77	1,62	
3,15 mm	3,53	4,46	3,84	4,28	3,54	3,97	3,81	3,48	1,31	
3,15 mm	4,22	4,29	3,62	4,03	4,13	4,20			1,14	

H3. 4 MM-STAVSIKT

- 116 målte verdier.
- 50 ligger innenfor toleransen.
- 53 av målingene ligger under nedre toleransegrense.
- 13 av målingene ligger over øvre toleransegrense.
- Gjennomsnittsverdi: 3,88 mm

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
4 mm	3,92	3,88	3,91	3,87	3,82	3,88	3,65	4,32	-0,35	±0,13
4 mm	3,81	3,88	3,72	3,99	3,77	3,90	3,84	3,77	-0,28	
4 mm	3,87	3,95	3,80	3,94	3,64	4,02	3,65	4,13	-0,36	
4 mm	3,79	4,05	3,77	3,83	3,83	3,81			-0,23	
4 mm	3,84	3,76	3,96	3,77	4,18	3,59	4,22	3,76	-0,41	
4 mm	3,98	3,69	4,01	3,68	4,07	3,51	4,11	3,53	-0,49	
4 mm	4,21	3,60	3,90	3,91	3,85	3,85	3,89	4,16	-0,40	
4 mm	3,82	3,81	3,87	3,95	3,90	3,81			-0,19	
4 mm	3,89	3,82	4,20	3,77	4,01	4,03	3,90	3,78	-0,23	
4 mm	4,03	3,96	3,89	3,69	4,16	3,56	4,20	3,35	-0,65	
4 mm	4,21	3,52	4,08	3,98	3,92	4,12	3,70	3,67	-0,48	
4 mm	3,85	3,69	3,85	3,91	3,73	4,16	3,65	4,24	-0,35	
4 mm	3,53	4,22	3,59	4,13	3,72	4,11	3,79	3,87	-0,47	
4 mm	3,74	4,00	3,95	3,87	3,89	3,76	4,10	4,06	-0,26	
4 mm	3,57	4,07	3,76	3,98	3,77	3,78	4,01	4,22	-0,43	

H4. 5 MM-STAVSIKT

- 112 målte verdier, 25 av disse innenfor toleransegrensen.
- Gjennomsnittsverdi: 4,80
- 19 målinger ligger over øvre toleranse.
- 68 målinger ligger undre nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
5 mm	5,39	4,57	4,66	5,38	4,60	4,74	4,96	4,61	-0,43	±0,14
5 mm	4,90	4,76	4,88	5,33	4,70	5,17	3,94	5,21	-1,06	
5 mm	4,49	4,91	4,33	4,90	4,43	5,18	4,55	4,90	-0,67	
5 mm	4,58	4,92	4,43	4,58	5,14	4,57	4,63	5,03	-0,57	
5 mm	4,46	4,49	4,75	4,77	4,78	4,69	4,96	4,73	-0,54	
5 mm	4,67	4,67	4,82	4,52	5,06	3,81	5,53	4,52	-1,19	
5 mm	5,22	4,67	4,94	4,82	4,64	4,82	4,81	4,56	-0,44	
5 mm	4,90	4,89	4,77	5,17	4,75	4,78	4,80	4,81	-0,25	
5 mm	5,19	4,89	4,41	5,28	4,50	5,47	4,39	4,71	-0,61	
5 mm	4,61	4,55	5,19	4,43	5,05	4,67	5,06	4,69	-0,57	
5 mm	5,16	5,06	4,63	4,89	4,46	4,53	4,54	5,58	0,58	
5 mm	4,78	4,51	5,02	4,59	5,14	5,42	4,30	4,88	-0,70	
5 mm	4,69	5,08	4,42	5,42	4,61	4,74	4,82	5,05	-0,58	
5 mm	4,85	4,54	4,94	4,48	5,16	4,82	4,51	5,18	-0,52	

H5. 6,3 MM-STAVSIKT

- 101 målte verdier, 40 av disse ligger innenfor toleransegrensen.
- Gjennomsnittsverdi: 6,07 mm
- 7 målinger ligger over øvre toleranse.
- 54 målinger ligger undre nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
6,3 mm	6,08	6,46	5,81	6,42	6,40	5,90	6,19	5,62	-0,68	±0,17
6,3 mm	5,79	6,24	5,49	6,52	5,42	6,69	6,08	5,60	-0,88	
6,3 mm	6,14	6,00	6,15	5,84	6,43	5,79	6,29	5,87	-0,51	
6,3 mm	5,76	5,95	6,11	5,97	6,22	6,08	5,92	6,23	-0,54	
6,3 mm	5,89	6,00	6,19	6,52	5,25	6,43	6,00	5,76	-1,05	
6,3 mm	6,17	5,85	6,15	6,04	5,94	6,19	6,03	6,23	-0,45	
6,3 mm	6,38	5,93	6,55	6,10	6,49				-0,37	
6,3 mm	5,87	6,37	5,87	6,30	5,67	6,44	5,83	6,61	-0,63	
6,3 mm	5,56	6,40	5,41	6,23	6,35	7,25	5,16	5,45	-1,14	
6,3 mm	6,37	5,81	6,23	5,73	5,75	6,45	5,90	6,14	-0,57	
6,3 mm	5,76	6,08	5,94	6,17	6,08	6,21	5,97	6,29	-0,54	
6,3 mm	6,30	5,80	6,25	6,01	6,25	5,57	6,33	6,41	-0,73	
6,3 mm	5,79	6,22	5,79	6,39	5,95	6,14	6,08	6,16	-0,51	

H6. 8 MM-STAVSIKT

- 84 målte verdier, av disse ligger 25 innenfor toleransen.
- Gjennomsnittsverdi: 7,76 mm
- 4 målinger ligger over øvre toleranse.
- 55 målinger ligger under nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
8 mm	7,48	7,58	7,78	8,04	7,38	7,99	7,41	8,27	-0,62	±0,19
8 mm	7,65	7,56	7,19	7,38	8,05	8,12	7,67	7,71	-0,81	
8 mm	7,70	7,68	7,73	7,64	7,57				-0,43	
8 mm	7,61	7,64	7,73	7,71	7,68	7,70	7,70	8,08	-0,39	
8 mm	8,04	7,22	7,30	7,60	7,68	8,29	7,41	7,96	-0,78	
8 mm	7,40	8,06	7,73	7,63	7,50				-0,60	
8 mm	7,65	7,59	7,97	7,63	7,60	7,90	8,03	7,56	-0,44	
8 mm	7,72	7,59	7,72	8,03	7,74	8,24	7,30	8,04	-0,70	
8 mm	7,42	8,09	7,62	7,73	7,97				-0,58	
8 mm	7,73	7,58	7,79	7,71	7,90	7,42	7,93	8,00	-0,58	
8 mm	9,42	7,99	7,89	7,97	7,50	8,15	7,33	8,03	1,42	
8 mm	7,61	8,12	7,69	7,90	7,70				-0,39	

H7. 10 MM-STAVSIKT

- 64 målte verdier, 28 av disse ligger innenfor toleransegrense.
- Gjennomsnittsverdi: 9,75
- 3 målinger ligger over øvre toleranse.
- 33 målinger ligger under nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
10 mm	9,78	9,96	9,56	10,14	9,35	9,87	9,71	10,09	-0,65	±0,21
10 mm	9,62	9,44	9,35	10,02	9,36	10,02	9,35	10,16	-0,65	
10 mm	9,11	10,10	9,98	9,73	10,00	9,59	10,04	9,68	-0,89	
10 mm	10,24	9,13	10,22	9,36	10,01	9,36	10,04	9,45	-0,87	
10 mm	9,24	9,81	9,90	9,89	9,64	9,55	10,16	9,55	-0,76	
10 mm	9,65	10,15	9,43	9,60	9,58	9,99	9,50	10,30	-0,57	
10 mm	9,91	9,51	9,85	9,72	9,79	9,79	9,64	9,81	-0,49	
10 mm	9,76	9,53	10,09	9,62	10,01	9,48	10,02	9,80	-0,52	

H8. 12,5 MM-STAVSIKT

- 64 målte verdier, 29 av disse ligger innenfor toleransegrensen.
- Gjennomsnittsverdi: 12,20 mm
- 2 målinger ligger over øvre toleranse.

- 33 målinger ligger undre nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
12,5 mm	12,10	12,36	12,28	12,12	11,79	12,77	12,38	11,38	-1,12	±0,24
12,5 mm	12,26	11,76	12,42	12,07	12,43	11,84	12,39	12,22	-0,74	
12,5 mm	12,30	12,39	11,98	12,37	12,07	12,42	11,68	12,40	-0,82	
12,5 mm	11,35	12,22	12,94	11,65	12,15	12,17	12,54	12,00	-1,15	
12,5 mm	12,35	12,15	12,46	12,16	12,47	11,88	12,56	11,91	-0,62	
12,5 mm	12,11	12,13	12,33	12,19	12,16	12,15	12,41	12,28	-0,39	
12,5 mm	12,43	12,45	11,94	12,27	12,06	12,39	11,84	12,49	-0,66	
12,5 mm	11,83	12,02	12,71	11,83	12,44	12,28	12,67	12,19	-0,67	

H9. 16 MM-STAVSIKT

- 52 målte verdier, 20 av disse ligger innenfor toleransen.
- Gjennomsnittsverdi: 15,64 mm
- 0 målinger ligger over øvre toleranse.
- 32 målinger ligger undre nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
16 mm	15,47	15,99	15,47	15,68	15,92	15,37	15,66	15,73	-0,63	±0,27
16 mm	15,57	15,82	15,45	15,91	15,26				-0,74	
16 mm	15,51	16,03	15,10	15,59	15,57	15,75	15,81	15,40	-0,90	
16 mm	15,79	15,99	15,37	15,71	15,63				-0,63	
16 mm	15,47	15,93	15,31	15,68	15,92	15,35	15,66	15,73	-0,69	
16 mm	15,57	15,81	15,49	15,92	15,25				-0,75	
16 mm	15,29	15,86	15,54	15,73	15,62	15,69	15,75	15,61	-0,71	
16 mm	15,79	15,54	15,70	15,85	15,50				-0,50	

H10. 20 MM-STAVSIKT

- 44 målte verdier, 16 av disse ligger innenfor toleransen.
- Gjennomsnittsverdi: 19,68 mm
- 0 målinger ligger over øvre toleranse.

- 28 målinger ligger undre nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
20 mm	19,69	19,65	19,70	19,59	19,62	19,86	19,59	19,72	-0,41	±0,30
20 mm	19,51	19,71	19,84						-0,49	
20 mm	19,76	19,72	19,62	19,66	19,64	19,59	19,68	19,55	-0,45	
20 mm	19,79	19,63	19,65						-0,37	
20 mm	19,64	19,65	19,66	19,55	19,65	19,98	19,53	19,78	-0,47	
20 mm	19,43	19,76	19,87						-0,57	
20 mm	19,90	19,67	19,53	19,71	19,58	20,00	19,69	19,34	-0,66	
20 mm	19,74	19,60	19,68						-0,40	

H11. 25 MM-STAVSIKT

- 36 målte verdier, 21 av disse ligger innenfor toleransegrensen.
- Gjennomsnittsverdi: 24,67
- 0 målinger ligger over øvre toleranse.
- 15 målinger ligger undre nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
25 mm	24,29	24,82	24,76	24,96	24,26	24,63	25,02	24,64	-0,74	±0,35
25 mm	24,80	24,49	24,80	24,52					-0,51	
25 mm	24,63	24,68	24,67	24,78	24,46	24,74	24,72	24,51	-0,54	
25 mm	24,30	24,81	24,76	25,05	24,18	24,59	24,78	24,65	-0,82	
25 mm	24,79	24,74	24,60	24,45	25,00	24,46	24,89	24,71	-0,55	

H12. 31,5 MM-STAVSIKT

- 28 målte verdier, 11 av disse ligger innenfor toleransegrensen.
- Gjennomsnittsverdi: 31,02
- 0 målinger ligger over øvre toleranse.
- 17 målinger ligger undre nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
31.5 mm	30,96	30,97	31,02	30,96	31,54	31,27	30,54		-0,96	±0,40
31.5 mm	30,90	31,23	31,16	30,97	31,21	30,54	31,15		-0,96	
31.5 mm	30,97	30,93	31,02	31,01	31,28	31,27	30,55		-0,95	
31.5 mm	30,97	31,21	30,81	31,01	31,22	30,65	31,19		-0,85	

H13. 40 MM-STAVSIKT

- 24 målte verdier, 18 av disse ligger innenfor toleransen.
- Gjennomsnittsverdi: 39,67 mm
- 0 målinger ligger over øvre toleranse.
- 6 målinger ligger under nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
40 mm	39,58	39,72	39,71	39,20	39,12	40,10				±0,45
40 mm	40,00	39,60	39,59	40,20	39,59	39,92				
40 mm	39,28	39,95	39,56	39,30	39,33	39,88				
40 mm	39,78	39,66	39,31	40,21	39,61	39,92				

H14. 50 MM-STAVSIKT

- 20 målte verdier, 13 av disse ligger innenfor toleransegrensen.
- Gjennomsnittsverdi: 49,61 mm
- 0 målinger ligger over øvre toleranse.
- 7 målinger ligger under nedre toleranse.

Sikte- åpning	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Måling 6	Måling 7	Måling 8	Avvik ± mm	Tol.krav i mm
50 mm	49,39	49,63	50,20	48,55	49,53				-1,45	±0,50
50 mm	49,70	49,25	50,25	49,67	49,24				-0,76	
50 mm	49,81	49,60	50,19	48,89	49,30				-1,11	
50 mm	49,44	49,83	50,03	49,68	49,99				-0,56	