

Simen Mathisen

Metodestudium av micro-Deval for alternative fraksjoner

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Helge Mork

Medveileder: Arnhild Ulvik og Marit Fladvad

Juni 2022

Simen Mathisen

Metodestudium av micro-Deval for alternative fraksjoner

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Helge Mørk
Medveileder: Arnhild Ulvik og Marit Fladvad
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Den europeiske standarden for bestemmelse av motstand mot slitasje ved bruk av micro-Deval, EN 1097-1, er under revisjon. I et høringsutkast for denne revisjonen, prEN 1097-1, er det beskrevet to nye metoder som omhandler testing på fine fraksjoner (0.25/5.6 mm og 0.2/4 mm i henholdsvis Annex D og Annex E) (CEN, 2021). I tillegg beskriver gjeldende utgave muligheten til å teste på nærliggende fraksjoner til referansefraksjonen 10/14 mm, deriblant 8/11.2 og 11.2/16 mm. Statens vegvesen er interessert i at disse metodene blir sett nærmere på.

Statens vegvesen stiller flere krav til steinmaterialer som skal benyttes til veg, deriblant til de mekaniske egenskapene. Selv om en stor andel av materialet som benyttes i asfalttilslag og i bærelaget er mindre enn 4 mm, testes materialet på grove fraksjoner. Dette gjelder både for micro-Deval, kulemølle og Los Angeles. Dette kan være problematisk siden det ikke er sikkert at et materiale innehar de samme egenskapene i alle størrelser (Strzałkowski og Kaźmierczak, 2021). I Nord-Amerika er det tatt hensyn til dette ved at micro-Deval er standardisert for både fine og grove fraksjoner (ASTM, 2015; 2017).

Metodene for fine fraksjoner som er beskrevet i Annex D og Annex E i prEN 1097-1 har flere forskjeller fra standard micro-Deval enn bare kornstørrelsen. Det er endring i kjøretid, kulestørrelse, total kulevekt og siktåpning ved vasking. Kjøretiden reduseres til 15 minutter, diameterne til kulene består av en blanding av 10, 18 og 30 mm med en sammenlagt vekt på 2500 g og siktåpningen ved vasking er endret til 0.063 eller 0.1 mm, avhengig av metode. Litteraturen rundt dette forskningsfeltet beskriver hvordan en endring i disse parameterne påvirker resultatene oppnådd ved bruk av micro-Deval-metoden. Noen forfattere fant resultater som viste at en økning i kornstørrelse ga en mindre M_{DE} , mens andre oppnådde motsatt resultat. Ved å øke den totale vekten av stålkulene opp til ett visst punkt ble det funnet økning i vekttapet (Tanyu, Yavuz og Ullah, 2017). Over dette punktet ble vekttapet redusert. En reduksjon i rotasjonstiden, uten å endre rotasjonshastigheten, reduserer også micro-Deval-verdien (Lane *et al.*, 2011). Litteraturen viser også flere funn som påpeker at mineralogien til materialene har mye mer påvirkning på testen enn kornformen.

Ved å teste 19 materialer for de to nye metodene for fine fraksjoner, for 8/11.2 og 11.2/16 mm, samt referansefraksjonen 10/14 mm blir det sett på om det finnes en sammenheng mellom metodene. I tillegg sees resultatene opp mot geologiske parametere som andel myke mineraler, graderingstallet til siktekurven og en ikke-standardisert flisighet. Resultatene tyder på at det er en veldig god korrelasjon mellom testing på referansefraksjonen, 8/11.2 og 11.2/16 mm. Det vises også en korrelasjon mellom standard metode og metodene for fine fraksjoner, men den er ikke like sterk. Andel myke mineraler ser ut til å ha en stor innvirkning på resultatene fra alle metodene, mens graderingstallet og den ikke-standardiserte flisigheten har liten innflytelse.

Abstract

The European standard for the determination of the resistance to wear by using the micro-Deval method, EN 1097-1, is under revision. In a draft for this revision there is described two new methods for testing on fine aggregates (In Annex D and Annex E, respectively 0.25/5.6 mm and 0.2/4 mm) (CEN, 2021). In addition, the current edition describes the possibility for testing on aggregate sizes adjacent to the reference fraction, including 8/11.2 and 11.2/16 mm. The Norwegian Public Roads Administration is interested in taking a closer look at these methods.

The Norwegian Public Roads Administration sets several requirements for stone materials to be used in roads, including the mechanical properties. Although a considerable proportion of the materials used in asphalt aggregates and in the base layer are smaller than 4 mm, the materials are tested on coarse fractions. This applies to both the micro-Deval, Nordic mill and Los Angeles abrasion tests. This can be problematic since it is not certain that a material has the same properties in all sizes (Strzałkowski og Kaźmierczak, 2021). In North America, this has been taken into account by standardizing the micro-Deval method for both fine and coarse aggregates. (ASTM, 2015; 2017).

The methods for testing on fine aggregates described in Annex D and Annex E in prEN 1097-1 have more differences from standard micro-Deval than just the grain size. There is a change in rotation time, ball size, total ball weight and sieve opening when washing. The rotation time is reduced to 15 minutes, the diameters of the balls consist of a mixture of 10, 18 and 30 mm with a total weight of 2500 g and the sieve opening when washing is changed to 0.063 or 0.1 mm, depending on the method. The literature in this field of research describes how a change in these parameters affected the results obtained using the micro-Deval method. Some authors found results that showed an increase in grain size gave a smaller M_{DE} , while others achieved the opposite result. By increasing the total weight of the steel balls up to a certain point, an increase in weight loss was found (Tanyu, Yavuz og Ullah, 2017). Above this point, weight loss was reduced. A reduction in rotation time, without changing the rotation speed, also reduces the micro-Deval value (Lane *et al.*, 2011). The literature also shows several findings that point out that the mineralogy of the materials has a much greater impact on the test than the grain shape.

By testing 19 materials with the two new methods for fine aggregate and for the adjacent fractions, as well as the reference fraction 10/14 mm, it is seen whether there is a connection between the methods. In addition, the results are compared to geological parameters such as proportion of soft minerals, the grading number of the sieve curve and a non-standardized flakiness. The results indicate that there is an incredibly good correlation between testing on the reference fraction, 8/11.2 and 11.2/16 mm. There also is a correlation between the standard method and the methods for fine fractions, but it is not as strong. The proportion of soft minerals has a large impact on the results from all the methods, while and grading numbers and the non-standardized flakiness have little influence.

Forord

Denne masteroppgaven er en del av emnet TBA4940 Veg, masteroppgave ved institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU. Oppgaven har blitt utført våren 2022.

Gjennomføring av denne oppgaven har ikke vært mulig uten veiledning fra veileder ved NTNU, førsteamanuensis Helge Mork, og veiledere fra Statens vegvesen, Arnhild Ulvik og Marit Fladvad. Jeg vil også takke Statens vegvesen for muligheten til å bruke deres laboratorium, samt for tilgang på materialer. Til slutt vil jeg takke student Matias Vinje for muligheten til å utveksle resultater for å få et geologisk perspektiv på oppgaven.



Simen Mathisen

Trondheim, juni 2022

Innhold

Figurer	xi
Tabeller	xii
Symboler og ordforklaringer.....	xiii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Forskningsspørsmål	2
1.3 Oppgavens oppbygging	2
2 Teori	3
2.1 Vegoverbygning	3
2.1.1 Dekke.....	3
2.1.2 Bærelag	5
2.1.3 Forsterkningslag	5
2.1.4 Frostsikringslag.....	6
2.2 Mekanisk styrke	6
2.2.1 Skademekanismer.....	6
2.2.2 Testmetoder i Europa	7
2.2.3 Testmetoder i Nord-Amerika.....	10
2.2.4 Krav i Norge	12
2.2.5 Krav andre steder i verden	14
2.3 Modifikasjoner av micro-Deval	15
2.3.1 Kornstørrelse.....	15
2.3.2 Abrasjonsmateriale.....	17
2.3.3 Rotasjonstid og veieprosedyre	18
2.3.4 Vann	20
2.4 Geologisk påvirkning	20
3 Forskningsmetode.....	24
3.1 Litteratursøk.....	24
3.2 Materialer.....	26
3.3 Datainnsamling	27
3.3.1 Standard micro-Deval (10/14 mm).....	29
3.3.2 Annex C (8/11.2 mm og 11.2/16 mm).....	30
3.3.3 Annex D (0.25/5.6 mm).....	31
3.3.4 Annex E (0.2/4 mm).....	32
3.3.5 Geologiske data	33
4 Resultater	34

4.1	Standard micro-Deval (10/14 mm).....	34
4.2	Annex C (8/11.2 mm og 11.2/16 mm).....	36
4.3	Annex D (0.25/5.6 mm).....	40
4.4	Annex E (0.2/4 mm).....	43
4.5	Sammenligning mellom Annex D og Annex E	46
4.6	Flisighet	48
4.7	Mineralogi	49
4.8	Korngradering.....	51
5	Diskusjon.....	54
5.1	Grove fraksjoner	54
5.2	Fine fraksjoner.....	55
5.3	Vurderinger av avvikende materialer	57
5.4	Flisighet og mineralogi	59
5.5	Korngradering.....	61
5.6	Feilkilder	61
5.7	Videre arbeid	62
6	Konklusjon	64
	Referanser.....	65
	Vedlegg.....	70

Figurer

Figur 2.1 – Typisk vegoverbygning	3
Figur 2.2 – Tverrsnitt av tromlene for kulemølle (t.v.), Los Angeles og micro-Deval	8
Figur 2.3 – Resultater for ulike testfraksjoner (Rangaraju og Edlinski, 2008).....	16
Figur 2.4 – Resultater for ulike testfraksjoner (Gökalp, Uz og Saltan, 2016).....	17
Figur 2.5 – Resultater for ulik total kulevekt (Tanyu, Yavuz og Ullah, 2017).....	18
Figur 2.6 – Resultater for ulike kjøretider (Lane <i>et al.</i> , 2011)	19
Figur 2.7 – Resultater for ulike veieprosedyrer (Hossain, Lane og Schmidt, 2008a).....	20
Figur 2.8 – Sammenheng mellom hardhet og mølleverdi (Ulvik og Erichsen, 2006).....	21
Figur 2.9 – Mølleverdi for ulike bergarter (Ulvik og Erichsen, 2006)	22
Figur 2.10 – Endring i form, kantethet og tekstur i løpet av micro-Deval (Quintanilla <i>et al.</i> , 2019)	23
Figur 2.11 – Endring i kantetheten til sterk og svakt materiale (Ulvik og Erichsen, 2006)	23
Figur 3.1 – Flytskjema for litteratursøk.....	24
Figur 3.2 – Geografisk fordeling av materialene (figur: Arnhild Ulvik).....	27
Figur 3.3 – Generelt flytskjema for micro-Deval	28
Figur 3.4 – Tromler til micro-Deval	29
Figur 3.5 – Apparat til micro-Deval	29
Figur 3.6 – Stålkuler til micro-Deval (Diameterer fra venstre: 30, 18 og 10 mm).....	30
Figur 4.1 – Resultater, standard micro-Deval (M_{DE}).....	35
Figur 4.2 – Resultater, Annex - C 8/11.2 mm ($M_{DE8/11}$)	37
Figur 4.3 – Korrelasjon, 10/14 og 8/11.2 mm (M_{DE} og $M_{DE8/11}$).....	37
Figur 4.4 – Resultater, Annex C - 11.2/16 mm ($M_{DE11/16}$)	38
Figur 4.5 – Korrelasjon 10/14 og 11.2/16 mm (M_{DE} og $M_{DE11/16}$)	39
Figur 4.6 – Resultater, 10/14, 8/11.2 og 11.2/16 mm (M_{DE} , $M_{DE8/11}$ og $M_{DE11/16}$).....	39
Figur 4.7 – Resultater, Annex D (MM_{DE}).....	41
Figur 4.8 – Resultater, 10/14 mm og Annex D (M_{DE} og MM_{DE})	41
Figur 4.9 – Korrelasjon, 10/14 mm og Annex D (M_{DE} og MM_{DE}) inkludert materiale M17.....	42
Figur 4.10 – Korrelasjon, 10/14 mm og Annex D (M_{DE} og MM_{DE}) ekskludert materiale M17	42
Figur 4.11 – Korrelasjon, 10/14 mm og forholdet mellom Annex D og 10/14 mm (M_{DE} og MM_{DE}/M_{DE}) ekskludert materiale M17	42
Figur 4.12 – Resultater, Annex E (F_S).....	44
Figur 4.13 – Resultater, 10/14 mm og Annex E (M_{DE} og F_S)	44
Figur 4.14 – Korrelasjon, 10/14 mm og Annex E (M_{DE} og F_S) inkludert materiale M17	45
Figur 4.15 – Korrelasjon, 10/14 mm og Annex E (M_{DE} og F_S) ekskludert materiale M17 ..	45
Figur 4.16 – Korrelasjon, 10/14 mm og forholdet mellom Annex E og 10/14 mm (M_{DE} og F_S/M_{DE}) ekskludert materiale M17	45
Figur 4.17 – F_S for ulike kornfordelinger	46
Figur 4.18 – Resultater, Annex D og Annex E (MM_{DE} og F_S)	47
Figur 4.19 – Korrelasjon, Annex D og Annex E (MM_{DE} og F_S)	47
Figur 4.20 – Resultater, 10/14 mm, Annex D og Annex E (M_{DE} , MM_{DE} og F_S)	48
Figur 4.21 – Korrelasjon, Annex D og flisighet (MM_{DE} og $FI_{0.8}$).....	49
Figur 4.22 – Korrelasjon, Annex E og flisighet (F_S og $FI_{0.8}$).....	49
Figur 4.23 – Korrelasjon, 10/14 mm (M_{DE}) og andel myke mineraler	50
Figur 4.24 – Korrelasjon, Annex D (MM_{DE}) og andel myke mineraler	50
Figur 4.25 – Korrelasjon, Annex E (F_S) og andel myke mineraler	51

Figur 4.26 – Siktekurver for alle materialene	52
Figur 4.27 – Korrelasjon, Annex D og graderingstall (MM_{DE} og C_u)	53
Figur 4.28 – Korrelasjon, Annex E og graderingstall (F_s og C_u)	53
Figur 5.1 – M17 (t.v.) og M18 (t.h.) etter Annex D	58
Figur 5.2 – Kart over berggrunnen rundt M1 og M19.....	58
Figur 5.3 – Visuell sammenligning av M1 og M19 for Annex D og Annex E	59
Figur 5.4 – M7 og M18 før og etter standard micro-Deval	60

Tabeller

Tabell 2.1 – Asfalttyper for ulike situasjoner (Statens vegvesen, 2021)	4
Tabell 2.2 – Krav til siktekurver for Ab 11, Agb 11 og Ska 11 (Statens vegvesen, 2019)	4
Tabell 2.3 – Bruksområder for materialer i bærelag (Statens vegvesen, 2021)	5
Tabell 2.4 – Oppsummering spesifikasjoner kulemølle, Los Angeles og micro-Deval	7
Tabell 2.5 – Vektfordeling, Los Angeles for små grove korn (ASTM, 2014)	11
Tabell 2.6 – Kuler, Los Angeles for små grove korn (ASTM, 2014)	11
Tabell 2.7 – Vektfordeling, Los Angeles for store grove korn (ASTM, 2016).....	11
Tabell 2.8 – Vektfordeling micro-Deval for finkornet materiale i ASTM (ASTM, 2015)	12
Tabell 2.9 – Vektfordeling micro-Deval for grovkornet materiale i ASTM (ASTM, 2017)..	12
Tabell 2.10 – Bruksområder for testmetodene (Statens vegvesen, 2021)	12
Tabell 3.1 – Litteratursøk, innledende søk.....	25
Tabell 3.2 – Litteratursøk, søkeord for andregangssøk.....	25
Tabell 3.3 – Litteratursøk, andregangssøk	26
Tabell 3.4 – Materialer	27
Tabell 3.5 – Oppsummering spesifikasjoner for ulike gjennomføringsmetoder (micro-Deval).....	28
Tabell 3.6 – Vektfordeling for standard micro-Deval.....	30
Tabell 3.7 – Forskjeller mellom standard micro-Deval og Annex C	31
Tabell 3.8 – Vektfordelinger, Annex C	31
Tabell 3.9 – Mengde og størrelse på stålkuler, Annex D	31
Tabell 3.10 – Vektfordeling, Annex D	32
Tabell 3.11 – Mengde og størrelse på stålkuler, Annex E	32
Tabell 4.1 – Oppsummering, korrelasjoner	34
Tabell 4.2 – Resultater, standard micro-Deval - 10/14 mm (M_{DE}).....	35
Tabell 4.3 – Resultater, Annex C - 8/11.2 mm ($M_{DE8/11}$).....	36
Tabell 4.4 – Resultater, Annex C - 11.2/16 mm ($M_{DE11/16}$)	38
Tabell 4.5 – Resultater, Annex D (MM_{DE}).....	40
Tabell 4.6 – Resultater, Annex E (F_s)	43
Tabell 4.7 – Resultater, ulike kornsammensetninger av Annex E (F_s)	46
Tabell 4.8 – Resultater, flisighet (Vinje, In prep.)	48
Tabell 4.9 – Andel myke mineraler for de ulike materialene (Vinje, In prep.).....	50
Tabell 4.10 – Graderingstall	52
Tabell 5.1 – Eksempelverdier regnet ut etter regresjonslinjene.....	55

Symboler og ordforklaringer

Ab 11	Asfaltbetong med øvre kornstørrelse 11 mm. Notasjonen gjelder for også for andre asfalttyper og andre kornstørrelser. Eksempelvis betyr Agb 16 asfaltgrusbetong med øvre kornstørrelse 16 mm.
A_N	Mølleverdi/kulemølleverdi funnet ved kulemølletesten.
C_U	Graderingstallet funnet ved d_{10}/d_{60} , der d_{10} og d_{60} er siktåpningene henholdsvis 10 og 60% av materialets vekt passerer.
$FI_{0,8}$	En ikke-standardisert flisighetsindeks for materiale 0.8/4 mm.
F_S	Sprøhetstallet funnet ved micro-Deval utført etter Annex E i prEN 1097-1.
LA	Los Angeles-verdien funnet med Los Angeles-metoden.
Minste siktåpning	Siktstørrelsen som testeksemplaret vaskes på etter testing.
M_{DE}	Micro-Deval-verdien funnet med standard micro-Deval etter EN 1097-1.
$M_{DE8/11}$	Micro-Deval-verdien funnet med \emptyset micro-Deval utført etter Annex C i EN 1097-1 med testfraksjon 8/11.2 mm.
$M_{DE11/16}$	Micro-Deval-verdien funnet med \emptyset micro-Deval utført etter Annex C i EN 1097-1 med testfraksjon 11.2/16 mm.
MM_{DE}	Modifisert micro-Deval-verdi funnet ved micro-Deval utført etter Annex D i prEN 1097-1.
r	Korrelasjonskoeffisienten.
R^2	Korrelasjonskoeffisienten opphøyd i andre potens.
Testeksemplar	Prøveporsjon med materiale som utgjør en parallell.
Testprøve	En testprøve kan bestå av flere paralleller.
XRD	Røntgenkrystallografi. Røntgenstråler benyttes for å anslå mineralinnholdet til materialer.

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Det er flere skademekanismer som bidrar til at en veg får redusert levetid. Det kan komme av skader relatert til kulde som telehiv, teleløsning eller lavtemperatursprekker. Andre skader kan komme av deformasjoner og slitasje av asfalt eller underliggende lag. For å forsikre at veger blir bygd etter tilstrekkelig standard, har Statens vegvesen stilt krav til materialene som brukes ved bygging av veg (Statens vegvesen, 2021). For de fleste steinmaterialene som benyttes i vegoverbygningen stilles det krav til følgende:

- Mekaniske egenskaper
- Flisighet
- Korngradering
- Finstoffinnhold
- Andel knuste korn

I denne oppgaven ligger fokuset på de mekaniske egenskapene. I N200 presiseres tre ulike metoder for å klassifisere disse egenskapene hos steinmaterialer: Los Angeles-metoden, micro-Deval-testen og kulemølletesten. Kort fortalt tester Los Angeles-metoden steinprøvens evne til å motstå nedknusing, mens micro-Deval tester materialets evne til å stå imot slitasje grunnet friksjon. Kulemølletesten er en svensk test laget for å sjekke hvordan steinmaterialer i asfalttilslag motstår piggdekkslitasje.

I dag er det få krav som stilles til materialer med kornstørrelse mindre enn 4 mm som skal brukes som asfalttilslag, selv om noen asfalttyper kan inneholde stor grad av denne kornstørrelsen. En grunn til dette er at det er få standardiserte testprosedyrer. Testfraksjonen som brukes i micro-Deval for å sjekke tilslag som skal brukes til veg er 10/14 mm (CEN, 2011). EN 1097-1 åpner også opp for å teste andre fraksjoner, men disse er alle større enn 4 mm. For øyeblikket er denne standarden under revisjon. Høringsutkastet for denne revisjonen angir standardiserte metoder for micro-Deval til å teste kornstørrelser mindre enn 4 mm (CEN, 2021). En av disse metodene er testet ved en ringanalyse, hvor metoden ble beskrevet som godt reproducerbar (Westiner, Wörner og Neidinger, 2015).

Dagens standard gir mulighet for å teste på fraksjoner i nærheten av referansefraksjonen 10/14 mm. Deriblant fraksjonene 8/11.2 og 11.2/16 mm. Statens vegvesen er interessert i å se om resultatene fra disse fraksjonene er sammenlignbare med referansefraksjonen, fordi dette er fraksjonene som produseres i pukkverkene og inngår i asfaltresepter. Test av 10/14 mm medfører at de to sorteringene må blandes, for så å tilsiktes riktig prøvestørrelse og sammensetning.

1.2 Forskningsspørsmål

Denne masteroppgaven presenterer følgende forskningsspørsmål:

- Kan fraksjonene 8/11.2 og 11.2/16 mm testes i micro-Deval istedenfor referansefraksjonen 10/14 mm, samtidig som kravene opprettholdes?
- I hvilken grad kan testing i henhold til Annex D og Annex E i prEN 1097-1 sammenlignes med testing etter standard prosedyre?
- Er det en sammenheng mellom analyseresultatene og steinmaterialenes mineralsammensetning, form og korngradering?

1.3 Oppgavens oppbygging

Masteroppgaven starter med et teorikapittel. Kapitlet starter med en forklaring av hvordan en veg er bygd opp, og hvilke egenskaper de ulike lagene skal inneha. Ettersom oppgaven fokuserer på mekaniske egenskaper, vil de vanligste testene for disse egenskapene beskrives. Det vil også bli sett på hvilke krav som stilles til de ulike testene i Norge, i tillegg til noen andre steder i verden. Videre ser oppgaven på alternative og eksperimentelle varianter av micro-Deval-metoden, som kan gi innblikk i forsøkene som skal gjennomføres. Til slutt i teorikapitlet sees det på hvordan geologi påvirker de mekaniske egenskapene til materialer.

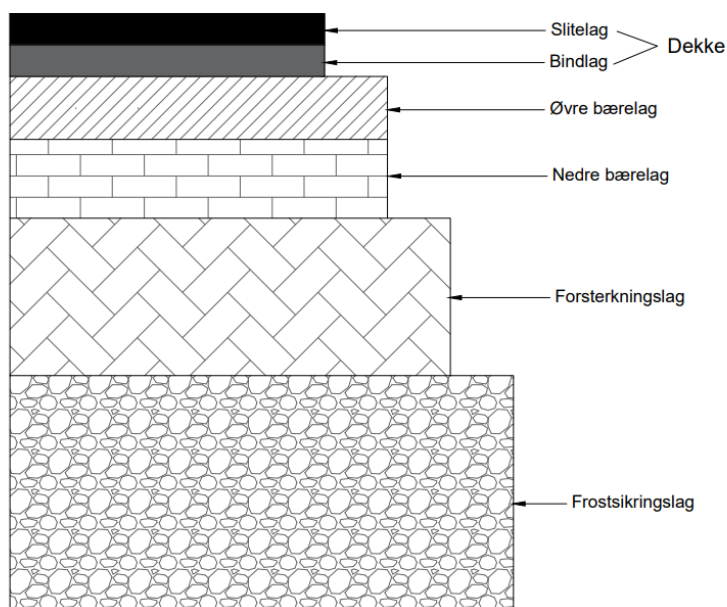
Etterfølgende kapittel handler om metoden og framgangsmåten som er benyttet i gjennomføring av oppgaven. Kapitlet starter med en beskrivelse av hvordan litteratursøket er gjort. Deretter kommer en oversikt og beskrivelse av hvilke materialer som har blitt benyttet til datainnsamling. Delkapitlet om datainnsamling beskriver standard micro-Deval og de fire alternative metodene som inngår i masteroppgaven. Det beskrives også hvordan en geologisk vinkling blir benyttet.

Neste kapittel handler om resultater. Her blir alle resultatene fra laboratoriet, som skal danne et tilstrekkelig datagrunnlag for å besvare forskningsspørsmålene gitt i delkapittel 1.2, lagt frem. Deretter drøftes resultatene i diskusjonskapitlet. Resultat- og diskusjonskapitlet legger grunnlaget for konklusjonene som kommer til slutt.

2 Teori

2.1 Vegoverbygning

Vegnettet måles ofte i lengde, men en like viktig faktor er volum. Uten den mindre synlige vegoverbygningen ville ikke vegen fungere som den skal. Det øverste laget i overbygningen er dekket, noe de fleste har en generell kjennskap til. Under dette er kunnskapen dårligere blant allmennheten. I lagene under dekket finnes bærelaget, forsterkningslaget og frostsikringslaget. En typisk vegoverbygning kan sees i Figur 2.1. Hvilke lag som benyttes avhenger av trafikkmengde og tilstanden på grunnen vegen bygges på (Statens vegvesen, 2021). Dette delkapittelet har til hensikt å kartlegge hvilke typer materialer som kan benyttes i en vegoverbygning.



Figur 2.1 – Typisk vegoverbygning

2.1.1 Dekke

Dekke kan deles inn i kategoriene asfalt- og grusdekke. I Norge kan grusdekker kun bygges dersom årsdøgnetrafikk (ÅDT) er mindre enn 100 (Statens vegvesen, 2021). Denne typen dekke lages av enten knust berg (Fk) eller knust grus (Gk) og innehar enten fraksjonene 0/11 mm eller 0/16 mm. For 0/11 mm-sorteringen skal 45-65% av den totale massen være mindre enn 5.6 mm dersom Fk benyttes. For Gk er denne andelen 55-75%. For 0/16 mm-sorteringen skal 45-65% være mindre enn 8 mm for Fk og 55-75% for Gk.

Det er litt flere valgmuligheter når det kommer til asfaltdekker. Valg av asfalttype til slitelaget bestemmes av flere faktorer, deriblant piggdekkslitasje, statiske lastpåkjenninger, vegtrafikkstøy, klimapåkjenninger og horisontale påkjenninger (Statens vegvesen, 2021). Dekkeslitasje som resultat av piggdekk avhenger av hastighet, trafikkmengde og piggdekkandel. Problemer tilknyttet statiske lastpåkjenninger kommer ofte i tilknytning høy tungtrafikkandel, som for eksempel i busslommer. Bildekkstøy er ofte et problem i tettbygde strøk, og derfor anbefales det asfalttyper som reduserer

lydforurensningen i disse områdene. For områder som mottar lite trafikkpåkjenninger vil levetiden til dekket i hovedsak bli påvirket av klimapåkjenninger, som for eksempel temperaturendringer. Horisontale påkjenninger vil dominere i for eksempel rundkjøringer. Tabell 2.1 viser hvilke asfalttyper Statens vegvesen anbefaler for de ulike slitasjemekanismene og ÅDT.

Tabell 2.1 – Asfalttyper for ulike situasjoner (Statens vegvesen, 2021)

Dominerende påkjenning	ÅDT				
	0-1500	1501-3000	3001-5000	5001-10 000	>10 000
Piggdekkslitasje		Ab 11 Ska 11	Ab 16 Ska 11 Ska 16	Ab 16 Ska 11 Ska 16	Ab 16 Ska 11 Ska 16
Statiske lastpåkjenninger	Ab 11	Ab 11 Ska 11	Ab 11 Ab 16 Ska 11 Ska 16	Ab 11 Ab 16 Ska 11 Ska 16	Ab 11 Ab 16 Ska 11 Ska 16
Bildekkstøy			T 8 Ab 8 Ska 11	T 11 Ab 11 Da 11 Ska 11	T 11 Ab 11 Da 11 Ska 11
Klimapåkjenninger	Ma 11 Agb 11 Ab 11	Ma 11 Agb 11 Ab 11	Ab 11 Ska 11		
Horisontale påkjenninger	Agb 11 Ab 11	Ab 11 Ska 11	Ab 11 Ska 11	Ab 11 Ska 11	Ab 11 Ska 11

Asfalt består av en sammensetning av steinmaterialer og bindemiddel. Bindemiddelet som i hovedsak brukes i asfalt er bitumen og tar opp omtrent 5% av vektandelen, mens steinmaterialene utgjør resten av asfalten. Selv om det er tilnærmet lik vektandel steinmaterialer for de ulike asfalttypene, er ikke siktekurven nødvendigvis lik. Ut fra Tabell 2.1 kommer det frem at vanlige asfalttyper er asfaltbetong (Ab), asfaltgrusbetong (Agb) og skjelettasfalt (Ska). En rapport fra Statens vegvesen beskriver siktekurvene for ulike asfalttyper (Statens vegvesen, 2019). Siktekurvene for Ab 11, Agb 11 og Ska 11 vises i Tabell 2.2. Tabellen viser at opp til 58, 66 og 45% av vekten til steinmaterialene i henholdsvis Ab 11, Agb 11 og Ska 11 kan være mindre enn 4 mm.

Tabell 2.2 – Krav til siktekurver for Ab 11, Agb 11 og Ska 11 (Statens vegvesen, 2019)

Siktåpning [mm]	Gjennomgang av vekt [%]		
	Ab 11	Agb 11	Ska 11
16	100	100	100
11.2	90-100	90-100	90-100
8	59-81	69-88	47-64
4	37-58	46-66	30-45
2	24-43	34-59	20-32
1	18-33	25-38	
0.25	9-16	10-20	12-20
0.063	5-10	5-10	9-13

2.1.2 Bærelag

Bærelagets funksjon i vegbyggingen er å fordele lastene vegen utsettes for til det underliggende forsterkningslaget, uten at det forekommer nedknusing eller deformasjoner (Statens vegvesen, 2021). Hvilke materialer som kan brukes i dette laget vises i Tabell 2.3.

Tabell 2.3 – Bruksområder for materialer i bærelag (Statens vegvesen, 2021)

Material		Trafikkgruppe											
		Øvre bærelag						Nedre bærelag					
		A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
Knust berg	Fk	X						X	X	X			
Asfaltert grus	Ag	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Asfaltert puk	Ap	X	X	X				X	X	X	X	X	X
Gjenbruksasfalt	Gja	X	X	X				X	X	X	X		
Knust asfalt	Ak	X	X					X	X	X	X		

Fra tabellen kommer det frem at asfaltert grus (Ag) og asfaltert puk (Ap) er to av materialene som kan brukes i de fleste tilfeller. Ettersom disse er bituminøse bærelag stilles det krav for binnemiddelgrad, kornkurve og bruksområde. For begge materialene skal den øvre kornstørrelsen ikke overgå 22.4 mm eller 2/5 av bærelagets tykkelse (Statens vegvesen, 2021). For begge disse bituminøse massetypene viser kravene fra Statens vegvesen sin håndbok om vegbygging at en stor prosentandel av steinmaterialene som skal benyttes, er mindre enn 4 mm. Et annet asfaltmateriale som kan brukes er knust asfalt (Ak). For Ak er det to ulike kornsorteringer som er tillatt, 0/22 og 0/32 mm. For begge disse stilles det krav til korngraderinger, hvor 30-65% skal være mindre enn 5.6 mm for 0/22-sorteringen og 20-50% skal være mindre enn 4 mm for 0/32-sorteringen. For veger i trafikkgruppe A, gang-/sykkelveger og lett trafikkerte parkeringsplasser kan også Gk og gjenbruksbetong (Gjb) velges som materiale. For disse materialene skal 20-41 prosent av vekten være mindre enn 2, 4, 5.6 og 8 mm for henholdsvis 0/22, 0/32, 0/45 og 0/63 mm-sorteringene.

2.1.3 Forsterkningslag

Vegens forsterkningslag skal fordele lasten som påføres vegoverflaten slik at det ikke påføres skader på underliggende lag. I tillegg skal forsterkningslaget drenere overliggende lag. Disse oppgavene er viktige for å opprettholde vegens dimensjonerte levetid (Statens vegvesen, 2021).

Det er flere materialtyper som tillates i dette veglaget, derav materialer produsert på veganlegg og i pukverk. Det stilles egne krav til gjenbruksmaterialer. Knust steinmateriale kan benyttes for alle ulike trafikkgrupper og er derfor et populært valg. N200 gir følgende eksempler over materialer og fraksjoner til bruk i forsterkningslag:

- Kult 22/125, 22/180
- Pukk 11/90, 16/90
- Samfengt knust berg 0/63, 0/90
- Knust- og uknust grus 0/63, 0/90
- Resirkulerte materialer 0/63, 0/90, 0/125, 22/125, 11/90, 16/90

En samfengt masse inneholder alle steinstørrelser i sorteringen, og har en kontrollert mengde finstoff. Kult, puk og samfengt knust berg er undergrupper av knuste

steinmaterialer. For samfengt knust berg, samt knust- og uknust grus kan opptil 42% av massen være mindre enn 4 og 5.6 mm for henholdsvis fraksjonene 0/63 og 0/90 mm.

For pukke og kult stilles det krav om at maksimalt 0-5 % av massen kan passere en sikt på halvparten av minste kornstørrelse. For pukke tilsvarende dette 5.6 mm for 11/90 mm-sortering og 8 mm for 16/90 mm-sortering, mens det for kult tilsvarende 11.2 mm-sikt for begge sine sorteringer. For resirkulerte materialer settes det krav til andel materialer mindre enn 0.063 mm. Dersom øverste kornstørrelse er mindre enn 90 mm kan andelen mindre enn 0.063 mm maks være 5% av massen. Dersom største kornstørrelse derimot er større enn 90 mm, kan maksimalt 5% av materialet mindre enn 90 mm være mindre enn 0.063 mm (Statens vegvesen, 2021).

2.1.4 Frostsikringslag

Ved å legge frostsikringslag i bunnen av overbygningen hindres frost fra å trenge ned i bakken under (Hoff, 2016). En mulig utforming er å benytte et lag bestående av knust- eller uknust grus eller knust berg (Statens vegvesen, 2021). En viktig parameter i frostsikringslaget er andel finstoff. Det må være nok finstoff til å bremse frostnedtrengningen, men ikke så mye at materialet selv blir telefarlig. Dersom øvre siktgrense er større enn 90 mm, angir N200 at minst 30% av frostsikringslaget skal være mindre enn 90 mm. Vektandelen mindre enn 0.063 mm skal ligge mellom 1 og 7 prosent av materialet mindre enn 90 mm. Dersom største kornstørrelse er mindre enn 63 mm, skal 2 til 15 prosent av vekten av materialer under 22.4 mm være mindre enn 0.063 mm. Videre settes det ingen flere krav til siktekurven til steinmaterialer som skal benyttes i frostsikringslaget.

2.2 Mekanisk styrke

2.2.1 Skademekanismer

Før tester og krav til mekanisk styrke beskrives, kan det være greit å få en oversikt over hvordan steinmaterialer brytes ned grunnet mekaniske påkjenninger. Dette avsnittet skal få frem bakgrunnen for testene som presenteres senere i delkapittelet.

Abrasiv slitasje

Abrasiv slitasje er et fenomen som oppstår ved at to steinkorn gnisser mot hverandre (Statens vegvesen, 2018b). I vegsammenheng skjer dette i hovedsak etter at trafikken har startet å gå på strekningen. Det forekommer også litt slitasje i transport og håndteringen av materialet. Siden materialet i overbygningen har blitt kompaktert i utleggingsfasen vil kornene oppnå ønsket egenskap med høy friksjon og skjærstyrke mellom dem (Quintanilla *et al.*, 2017). Ved at trafikk passerer på vegdekket, vil lasten fordeles nedover strukturen og tas opp i friksjonen mellom kornene. Det er når disse kornene ligger mot hverandre og gnisser det oppstår abrasiv slitasje som etter hvert kan redusere bæreevnen til vegen ved at friksjonen mellom kornene blir redusert. Det kan også skape mer finstoff som potensielt kan gi problemer med telefarlighet dersom materialet i utgangspunktet ligger på grensen for høyt finstoffinnhold.

Piggdekkslitasje

I avsnitt 2.1.1 ble det nevnt enkelte mekanismer som påfører vegdekket skade, deriblant piggdekkslitasje. Piggdekk ble oppfunnet i 1960-årene for å øke friksjonen på isbelagte veier (Wikse, 2022). Ikke lenge etter steg skadene på norske vegdekker grunnet disse nye dekkene (Statens vegvesen, 1996). Det første som slites av asfalten er bindemiddel

og finkornet materiale. Deretter slites eller skrapes større steiner vekk, før nytt finkornet materiale igjen blir tilgjengelig for slitasje og prosessen fortsetter. Statens vegvesen anslår at en person med 10 km reisevei til jobb i løpet av en vinter vil produsere 20 kg svevestøv på grunn av piggdekkslitasje, dersom vedkommende kjører til og fra jobb hver dag (Statens vegvesen, 2020).

Nedknusing

Noe av den totale skaden på steinmaterialene, skjer før åpning av veien. Nedknusing av materiale kan forekomme i både transport og utleggingsfasen. I utleggingsfasen komprimeres materialet for å øke bæreevnen til vegkroppen (Statens vegvesen, 2014a). For å gjennomføre denne komprimeringen brukes gjerne valser. En metode som brukes er ved hjelp av vibrasjoner som gjør at trommelen til valsen slår ned på underlaget. Da er det viktig at trommelen tilfører nok energi til underlaget, slik at hele lagets dybde komprimeres. Samtidig, dersom det blir for mye energi vil kornene knuses. Sannsynligheten for dette øker jo mer komprimert laget blir ettersom friksjonen mellom kornene øker. Siden komprimeringsenergien minker nedover i laget, blir faren for nedknusing størst i toppen.

2.2.2 Testmetoder i Europa

I Norge er det i hovedsak tre ulike testmetoder som brukes til å finne de mekaniske egenskapene til steinmaterialer. Disse testene er Los Angeles, micro-Deval og kulemåle (Statens vegvesen, 2021). Hver enkelt test utføres i henhold til europeiske standarder, som følges av alle medlemslandene av CEN. Dette inkluderer alle medlemsland av EU, i tillegg til Norge, Island, Nord-Makedonia, Sveits, Storbritannia, Serbia og Tyrkia (Hofstad, 2021). De tre testene kan relateres til de tre skademekanismene beskrevet i avsnitt 2.2.1. En oppsummering av forskjellene mellom testene er gjengitt i Tabell 2.4.

Tabell 2.4 – Oppsummering spesifikasjoner kulemåle, Los Angeles og micro-Deval

	Kulemåle	Los Angeles	Micro-Deval
Antall kuler	-	11	-
Total masse kuler [g]	7000	4690 - 4860	5000
Fraksjon [mm]	11.2/16	10/14	10/14
Mellomsikt [mm]	14	11.2 eller 12.5	11.2 eller 12.5
Masse som passerer mellomsikt [%]	65±1	30-40 eller 60-70	30-40 eller 60-70
Vann [liter]	2	-	2,5
Masse testeksemplar [g]	Ca. 1000	5 000	500
Minste siktåpning [mm]	2	1.6	1.6
Antall rotasjoner	5400	500	12 000
Rotasjonshastighet [r/min]	90	32	100
Tid [min]	60	15	120
Lengde trommel [mm]	335	508	154
Diameter trommel [mm]	206,5	711	200

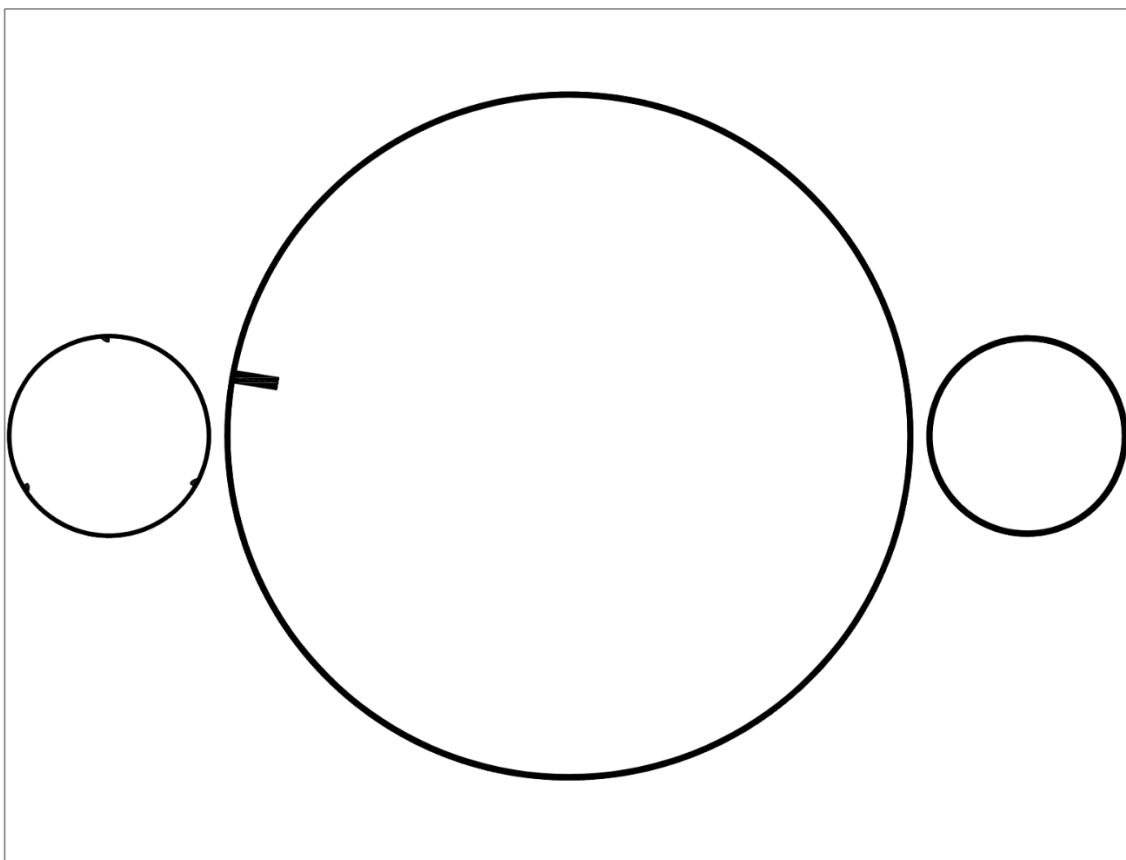
Micro-Deval

Micro-Deval måler motstand mot slitasje. Prinsippet for gjennomføring er å rotere et testeksemplar sammen med stålkuler og vann i en trommel. Dette vil skape abrasiv slitasje på steinmaterialet. Micro-Deval-verdien bestemmes av hvor stor andel av testeksemplaret

som passerer en sikt på 1.6 mm etter kjøring (CEN, 2011). For gjennomføringen trengs to testeksemplar à 500 g som skal plasseres i hver sin trommel. Testeksemlarene består av testfraksjonen 10/14 mm, med mellomsikt 11.2 eller 12.5 mm hvor henholdsvis 30-40 eller 60-70% av eksemplarets vekt skal passere. I hver trommel skal det i tillegg legges 5000 g stålkuler med diameter 10 mm og 2,5 liter vann. Tverrsnittet til den sylindriske trommelen med diameter 200 mm og indre lengde 154 mm er illustrert i Figur 2.2. Den roteres med en hastighet på 100 rotasjoner i minuttet i 120 minutter slik at den totalt roteres 12 000 ganger. Materialet som i løpet av kjøringen har blitt mindre enn 1.6 mm siktes vekk og eksemplaret har nå en ny vekt, m . For hvert testeksemplar regnes micro-Deval-verdien, M_{DE} , ut fra følgende formel:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5}$$

M_{DE} for en prøve er gjennomsnittet av verdiene for de to testeksemlarene.



Figur 2.2 – Tverrsnitt av tromlene for kulemølle (t.v.), Los Angeles og micro-Deval

Kulemølle

Til å simulere steinmateriales motstand mot piggdekkslitasje benyttes den svenskutviklede kulemølltesten (Erichsen, Ulvik og Sævik, 2011). Testen går ut på å sjekke hvor stor andel av et materiale med fraksjon 11.2/16 mm som blir mindre enn 2 mm etter tromling sammen med stålkuler og vann (CEN, 2014). Stålkulene som benyttes har en diameter på 15 mm og en sammenlagt vekt på 7000 g. Trommelen skal inneholde 2 liter vann og et testeksemplar med vekt M_1 , som bestemmes ut fra følgende formel:

$$M_1 = \frac{1000 \rho_p}{2,65} \pm 5$$

Der ρ_p er materialets densitet. Videre skal 65% av vekten passere mellomsikten med siktåpning 14 mm. Sammen tromles eksemplaret med vann og kuler i 5400 rotasjoner med en hastighet på 90 rotasjoner i minuttet. Dette tilsvarer en kjøretid på 60 minutter. Trommelen som benyttes har en sylindrisk form med innvendig lengde 335 mm og diameter 206,5 mm. Den skal også ha tre innvendige hyller med lengde 333 mm som på det tykkeste er 8 mm. Et tverrsnitt av trommelen er illustrert i Figur 2.2. Kulemølleverdien, A_N , til et eksemplar regnes ut etter følgende formel:

$$A_N = \frac{M_1 - M_2}{M_1}$$

Der M_1 er opprinnelig vekt og M_2 er vekten som er større enn 2 mm etter utført test. For å regne ut en kulemølleverdi må to testeksemplare testes. Verdien regnes ut som gjennomsnittet fra de to eksemplarene.

Los Angeles

Los Angeles måler motstand mot fragmentering ved at stålkuler og prøven slår mot hverandre i en roterende trommel. Etter testing bestemmer gjenværende materialer større enn 1.6 mm kvaliteten på materialet (CEN, 2020). Den totale vekten av prøven er 5 kg og testen benytter samme fraksjon, mellomsikt og andel vekt som passerer mellomsiktet som micro-Deval. I motsetning til micro-Deval og kulemølle utføres denne testen uten tilsatt vann. Kulene som benyttes er også større. Det skal legges inn 11 kuler som hver har en diameter på ca. 47 mm, den totale vekten av kulene blir da mellom 4690 og 4860 g. Ettersom prøven og kulene totalt vil ha mye større volum enn for kulemølle og micro-Deval, trengs en større trommel. Trommelen har sylindrisk form med indre lengde 508 mm og diameter 711 mm. En illustrasjon av tverrsnittet er vist i Figur 2.2. Etter at testen har rotert 500 ganger med en hastighet på 32 rotasjoner i minuttet, som tilsvarer omtrent 15 minutter, veies steinmaterialet som fortsatt er større enn 1.6 mm. Deretter regnes Los Angeles-verdien, LA , ut fra følgende formel:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

Der m er vekten på materialet som er større enn 1.6 mm etter utført test. Denne testmetoden krever bare ett testeksemplar.

Alternative utførelser

I hver av standardene for de tre testene er det også tillegg som beskriver alternative metoder å utføre testene på (CEN, 2011; 2014; 2020). Dette avsnittet beskriver disse alternativene.

EN 1097-9 gir bare en alternativ variasjon for kulemølletesten (CEN, 2014). I denne metoden benyttes fraksjonen 8/11.2, istedenfor 11.2/16 mm. Ved denne fraksjonen endres mellomsiktet til 10 mm. Diameteren til stålkulene reduseres også fra 15 til 11,1 mm.

I EN 1097-2 er det to tillegg som angir andre varianter av Los Angeles-metoden (CEN, 2020). En av disse er tilpasset for å teste på jernbaneballast. I dette tillegget økes fraksjonen til 31.5/50 mm med mellomsikt 40 mm. Hver av delfraksjonene 31.5/40 mm og 40/50 mm skal bestå av 5000 g, slik at prøveeksemplarets totale vekt blir 10 000 g. Stålkulene som benyttes er de samme som for standard gjennomføring, men det skal legges til en ekstra. Dermed blir den totale kulevekten mellom 5 120 og 5 300 g. Trommelen, rotasjonshastigheten og minste siktåpning er også den samme som for

standard gjennomføring, men trommelen skal roteres 1000 ganger. Det åpnes også for å teste fraksjoner som ligger i nærheten av referansefraksjonen. Disse fraksjonene ligger mellom 4/6.3 og 11.2/16 mm. Vekt av stålkuler, mellomstiktet og vektandel som passerer mellomstiktet tilpasses testfraksjonen. Ellers er alt likt standard gjennomføring.

EN 1097-1 åpner for at også micro-Deval kan testes på fraksjonen 31.5/50 mm for å se på slitasje tilknyttet jernbaneballast (CEN, 2011). Som for Los Angeles økes testmassen til 10 kg, som skal fordeles likt på 31.5/40 mm og 40/50 mm-fraksjonene. På grunn av denne økningen i masse, er det også nødvendig å øke trommelstørrelsen. Diameteren er den samme som for referansefraksjonen, men lengden økes til 400 mm. Dette er over dobbelt så langt som for standard micro-Deval. Det er også endringer i antall rotasjoner og mengde vann. Antall rotasjoner er økt til 14 000, og mengde vann er redusert til 2 liter. I tillegg til testfraksjon er den største forskjellen fra standard gjennomføring at det ikke brukes stålkuler. Også som for Los Angeles er det mulig å teste for nærliggende fraksjoner av referansefraksjonen. Fraksjonene ligger mellom 4/6.3 og 11.2/16 mm. Mellomsiktet, vektandel som passerer mellomstiktet og total vekt kuler varierer med fraksjonen, ellers er utførelsen likt som standard gjennomføring. Standarden åpner også for testing under tørre forhold. Gjennomføringen utføres helt likt som standard gjennomføring, med unntak av at vann ikke tilsettes trommelen.

Noen av disse alternative metodene er veldig forskjellige i forhold til standard utførelse. Det er dermed ikke sikkert at det er de samme egenskapene som testes eller at metodene er direkte sammenlignbare med standard gjennomføring.

2.2.3 Testmetoder i Nord-Amerika

Kulemølle

Det synes ikke som at kulemølletesten er standardisert i ASTM-serien, som er den nordamerikanske ekvivalenten til CEN. Metoden beskrives derimot i en testmanual i Alaska (ADOT, 2018). Her beskrives metoden helt likt som i europeiske standarder.

Los Angeles

Los Angeles er en amerikansk metode som er tatt i bruk også i Europa. Prinsippet for metoden er derfor lik på begge kontinentene, men det er imidlertid noen forskjeller. I ASTM-serien finnes det to standarder for testing ved bruk av Los Angeles-metoden, en for små grove korn og en for store grove korn (ASTM, 2014; 2016). Trommelen, rotasjonshastigheten, antall rotasjoner og kulestørrelse for begge standardene er lik som for den europeiske standarden. For store grove korn skal det gjennomføres 1000 rotasjoner, mens for små grove korn er det 500. Hovedforskjellen mellom metodene er størrelsen på kornene. Tabell 2.5 viser de fire ulike vektfordelingene som beskrives i ASTM for små grove korn, mens Tabell 2.7 viser de tre ulike graderingene som er tillatt ved testing på store grove korn. For store grove korn benyttes 12 stålkuler, mens Tabell 2.6 viser at antall kuler varierer for små grove korn. Begge metodene benytter 1.70 mm som minste siktåpning.

Tabell 2.5 – Vektfordeling, Los Angeles for små grove korn (ASTM, 2014)

Siktåpning [mm]	Vekt [g]			
	A	B	C	D
25-37.5	1250	-	-	-
19-25	1250	-	-	-
12.5-19	1250	2500	-	-
9.5-12.5	1250	2500	-	-
6.3-9.5	-	-	2500	-
4.75-6.3	-	-	2500	-
2.36-4.75	-	-	-	5000
Sum	5000	5000	5000	5000

Tabell 2.6 – Kuler, Los Angeles for små grove korn (ASTM, 2014)

Gradering	Antall kuler	Total vekt kuler [g]
A	12	5000
B	11	4580
C	8	3330
D	6	2500

Tabell 2.7 – Vektfordeling, Los Angeles for store grove korn (ASTM, 2016)

Siktåpning [mm]	Vekt [g]		
	1	2	3
63-75	2500	-	-
50-63	2500	-	-
37.5-50	5000	5000	-
25-37.5	-	5000	5000
19-25	-	-	5000
Sum:	10 000	10 000	10 000

Micro-Deval

Som for Los Angeles er prinsippet for testing på de to kontinentene det samme, men testene er litt forskjellig. I ASTM-serien finnes det en standard både for fine og grove fraksjoner (ASTM, 2015; 2017). Testeksemplaret for testing på fine fraksjoner er sammensatt av materiale mellom 0.075 og 4.75 mm, med en vektfordeling vist i Tabell 2.8 og en total vekt på 500 g. I motsetning til den europeiske standardiseringen, blir testeksemplaret plassert i vann en time før testing. Stålkulene som benyttes har diameter 9,5 mm og en sammenlagt vekt på 1250 g. Et testeksemplar tromles i 15 minutter med en hastighet på 100 rotasjoner pr. minutt, som tilsvarer 1500 rotasjoner, sammen med stålkuler og 0,75 liter vann før det blir tørket, siktet og veid. Minste siktåpning som benyttes er 0.075 mm.

For grovkornet materiale benyttes vanligvis fraksjon 9.5/19 mm, men ASTM D6928-17 åpner opp for å bruke 4.75/12.5 og 4.75/9.5 mm dersom maksimal kornstørrelse er henholdsvis 12.5 og 9.5 mm (CCIL, 2019). Uavhengig av testfraksjon innehar testeksemplarene en vekt på 1500 g og fordeles som vist i Tabell 2.9. Testeksemplarene skal ligge vann i minst en time før testen gjennomføres. Et eksemplar og to liter vann

legges sammen med 5 kg stålkuler med diameter 9,5 mm og roteres med en hastighet på 100 rotasjoner i minuttet. Rotasjonstiden varierer for de ulike testfraksjonene. Tiden er 120 minutter for 9.5/19 mm, 105 minutter for 4.75/12.5 mm og 95 minutter for 4.75/9.5 mm. Dette tilsvarer henholdsvis 12 000, 10 500 og 9500 rotasjoner. For grove fraksjoner er minste siktåpning 1.18 mm. Den europeiske micro-Deval-metoden kan sies å tilsvare den nordamerikanske metoden for grove fraksjoner.

Tabell 2.8 – Vektfordeling micro-Deval for finkornet materiale i ASTM (ASTM, 2015)

Fraksjon [mm]	Vekt [g]
2.36 – 4.75	50
1.18 – 2.36	125
0.6 – 1.18	125
0.3 – 0.6	100
0.15 – 0.3	75
0.075 – 0.15	25
Totalt:	500

Tabell 2.9 – Vektfordeling micro-Deval for grovkornet materiale i ASTM (ASTM, 2017)

Fraksjon [mm]	Vekt [g]		
	Max 19.5 mm	Max 12.5 mm	Max 9.5 mm
16 – 19	375	-	-
12.5 – 16	375	-	-
9.5 – 12.5	750	750	-
6.3 – 9.5	-	375	750
4.75 – 6.3	-	375	750
Totalt:	1500	1500	1500

2.2.4 Krav i Norge

Grunnet testenes ulike bruksområder, stilles det krav til de forskjellige testmetodene for ulike lag i vegoverbygningen. Hvilke tester det stilles krav til i hvilke overbygningslag vises i Tabell 2.10. Tabellen viser at alle typer lag, med unntak av frostsikring og asfaltdekke, stiller krav til både Los Angeles og micro-Deval. Frostsikringslaget stiller ikke krav til mekaniske egenskaper, men fokuserer mer på kornstørrelse (Statens vegvesen, 2021). For bituminøse dekker byttes kravet for micro-Deval ut med kulemålling, grunnet kulemållingens formål om å teste motstand mot piggdekkslitasje. Det er ikke nødvendig å stille krav til begge testene ettersom de gir uttrykk for relativt like egenskaper (Erichsen, Ulvik og Sævik, 2011). Det er derimot liten korrelasjon mellom Los Angeles og de to andre testene (Hossain, Lane og Schmidt, 2008b; Lui, Zhao og Mullin, 2017).

Tabell 2.10 – Bruksområder for testmetodene (Statens vegvesen, 2021)

	Kulemålling	Los Angeles	Micro-Deval
Grusdekker		x	x
Asfaltdekker	x	x	
Bituminøse bærelag		x	x
Mekanisk stabiliserte bærelag		x	x
Forsterkningslag		x	x
Frostsikringslag			

Micro-Deval

Metoden har i de senere årene blitt introdusert i Norge. I Statens vegvesens håndbøker om vegbygging ble micro-Deval for første gang nevnt i 2005:

«Micro-Deval er standardisert metode for bestemmelse av slitasjemotstand på materialer til mekanisk stabilisering, men metoden er ikke i bruk her i landet. Den lignende kulemøllemetoden benyttes normalt kun for å måle dekkematerialers slitasjemotstand, men kan også brukes for vurdering av materialer (med høyt kalk-/glimmerinnhold) til bærelag. Materialet kan brukes dersom mølleverdien (A_N) er mindre enn 19.» Statens vegvesen (2005), håndbok 018, side 213.

Det ble derimot ikke stilt krav til bruk av denne metoden før i den etterfølgende utgaven fra 2011 (Statens vegvesen, 2011). Kravet til micro-Deval-verdien har også variert etter den først ble introdusert. I 2011 var kravet for alle typer bærelag ≤ 15 for de fleste trafikkgrupper, mens for trafikkgruppe A var kravet ≤ 20 . Det var ingen endring i kravene i N200 i 2014, 2018 eller gjeldende utgave (Statens vegvesen, 2014b; 2018a; 2021). Kravet har derimot hatt en endring for forsterkningslag. I 2011 var kravet ≤ 15 for øvre- og ≤ 20 for nedre forsterkningslag. I 2018 ble kravet mindre strengt. Kravet ble endret slik at steinmateriale måtte oppnå $M_{DE} \leq 20$, med unntak av vegger med trafikkgruppe A der forsterkningslaget kunne bestå av steinmaterialer med en maksverdi på 25. Dette kravet er også gjeldene i dag.

Kulemølle

Fra og med 1999-utgaven av vegnormalen har kulemølle og Los Angeles-metoden vært oppført i Statens vegvesen sine håndbøker om vegbygging (Statens vegvesen, 1999). Innføringen av disse metodene førte til at krav til abrasjonsmetoden ble fjernet i neste utgave. I 2005-versjonen står det:

«Abrasjonsverdi: Uttrykk for et steinmateriales slitestyrke. Uttrykkes som volumtap i cm^3 ved et bestemt slitasjearbeid på et standardisert prøvestykke. (Abrasjonsverdi er i nye håndbok 018 erstattet av mølleverdi.)» Statens vegvesen (2005) - håndbok 018, side 407.

Etter dette har altså metoden blitt erstattet av kulemølletesten. Som vist i Tabell 2.10 benyttes kulemølle kun for asfaltdekker. De gjeldene kravene for kulemølleverdi er avhengig av asfalttype, bruksområde og ÅDT. Bruksområdene som nevnes i N200 er overflatebehandling, varmeproduserte slitelag, varmeproduserte bindlag, fuktmembraner og kaldproduserte asfaltdekker (Statens vegvesen, 2021). For ÅDT ≤ 1500 , uavhengig av bruksområde og asfalttype, er kravet for kulemølleverdi ≤ 19 . Ved økende ÅDT blir kravet strengere for alle bruksområder, med unntak av fuktmembraner der kravet konstant er ≤ 19 . På det strengeste er kravet ≤ 7 . Dette gjelder for varmeproduserte slitelag med ÅDT større enn 15 000 og for asfalttypene Ab, Ska og støpeasfalt (Sta).

I N200 likestilles testing på 8/11.2 og 11.2/16 mm (Statens vegvesen, 2021). Resultatene for 137 analyser av pukkk fra en NGU-rapport viser at testing på disse fraksjonene gir en korrelasjon på tilnærmet 1, med en linje som ligger veldig nært linjen $x = y$ (Erichsen, 2014).

Los Angeles

Ettersom Los Angeles-metoden brukes som kvalitetssikring av materialer for de fleste overbygningsslagene, er kravene som stilles varierte. Som nevnt i forrige avsnitt kom Los Angeles-metoden for første gang inn i vegbyggingshåndbøkene i 1999. Denne gangen ble de kun oppført som veiledende verdier, og ikke krav (Statens vegvesen, 1999). I neste utgave av håndboken ble det derimot stilt krav til Los Angeles (Statens vegvesen, 2005) og i løpet av årene har disse kravene opplevd endringer. For varmeproduserte bituminøse

dekker er det minst strenge kravet i dag ≤ 40 , som gjelder for ÅDT mindre enn 300. For ÅDT over 15 000 er kravet på det strengeste for samtlige asfalttyper (≤ 20). Også for bituminøse bærelag avhenger kravene av ÅDT. Ved veldig liten ÅDT (< 300) er kravet ≤ 40 for alle typer asfalt, mens dersom ÅDT er høyere enn 5000 endres kravene til en maksverdi på 30 på det strengeste. For ÅDT mellom 300 og 5000 er kravet ≤ 35 . For mekanisk stabiliserte bærelag er kravet som regel ≤ 35 , men for trafikkgruppe A kan verdier opp til 40 godkjennes. Kravverdiene for mekanisk stabiliserte bærelag gjelder også for forsterkningslag.

2.2.5 Krav andre steder i verden

Sverige

Selv om Sverige bruker de samme testmetodene som Norge, betyr ikke det at kravene er like. For vegbygging i Sverige er det flere krav som må oppfylles. I bituminøse lag skal tilslag bestå av knust grus eller knust berg. For tilslag større enn 0.063 mm stilles følgende krav (Trafikverket, 2011b):

- Slitelag, bærelag og bindlag som skal ha trafikkpåkjenninger lengre enn 8 måneder eller på vinterstid skal oppfylle krav til Los Angeles, kulemølle og flisighet.
- Bærelag og bindlag skal oppfylle krav til Los Angeles, micro-Deval og flisighet.
- Hvis tilslaget som brukes har øvre kornstørrelse 11.2 mm skal fraksjonen 8/11.2 mm brukes i gjennomføring av Los Angeles, micro-Deval og kulemølle.

For bituminøse bindlag og -bærelag er ofte kravet til micro-Deval-verdien ≤ 15 . Dersom det er mye tungtrafikk skjerpes kravet for bindlag til ≤ 10 . For Los Angeles i disse lagene benyttes i hovedsak kravet ≤ 25 , men justeres til ≤ 20 for høyere ÅDT for enkelte asfalttyper. Det minst strenge Los Angeles-kravet som finnes i denne håndboken er ≤ 30 . Kravene for kulemølle er også avhengig av de samme parametere som de andre metodene. For de fleste asfalttypene er det minst strenge kravet ≤ 14 , men for mykbitumenasfalt til bruk i slitelag er det mulig å bruke materialer med verdier opp til 19 ved liten ÅDT. De strengeste kravene i håndboken er ≤ 7 for høy ÅDT på slitelag.

For ubundne materialer er kravene annerledes. For bærelag og forsterkningslag for asfalterte veger stilles det krav til maksimal M_{DE} på 20, men den kan økes til 25 dersom bærelaget ikke blir direkte utsatt for trafikk (Trafikverket, 2011a). Forsterkningslag og bærelag på grusveger skal ha $M_{DE} \leq 30$. For selve grusdekket skal verdien være under 30, men ikke være mindre enn 7. For bærelag på asfalterte veger kreves en maksimal Los Angeles-verdi på 40.

Canada

Vegmyndighetene i Canada er fordelt på de ulike provinsene. Kravene vil derfor kunne variere fra provins til provins.

I 1997 kom Richard og Scarlett med en rapport på vegne av kanadiske myndigheter angående innføringen av micro-Deval i landet (Richard og Scarlett, 1997). Her presenterte de blant annet krav til både fine og grove korn som allerede hadde blitt, eller sannsynligvis kom til å bli implementert i Ontario. Et krav til fine materialer i asfaltdekker ble satt til ≤ 20 . Mens bituminøse lag lengre ned i overbygningen hadde et krav på maksimalt 25. For grovere materialer ble det satt krav til ≤ 15 for slitelag, mens andre bituminøse lag hadde ≤ 20 som krav. For mekanisk stabilisert materiale var kravet ≤ 25 for bærelag og ≤ 30 for forsterkningslag. Transportmyndighetene i Quebec hadde også på denne tiden innført krav til micro-Deval. For fine materialer til bruk i bituminøse lag ble kravet satt til ≤ 30 eller

≤ 35 , mens det for grove korn varierte fra ≤ 15 øverst i vegstrukturen til ≤ 40 nederst. En slik sammenheng var det også for Los Angeles, med krav ≤ 35 øverst i strukturen og ≤ 50 nederst. Nova Scotia var den tredje og siste provinsen i Canada som på denne tiden hadde innført krav til micro-Deval. Kravene lå mellom ≤ 20 og ≤ 35 for ulike materialtyper. Kravet gjaldt for grove fraksjoner.

I senere tid har dette også blitt innført i flere provinser. I dag stilles det også krav til utførelse og verdi i British Columbia (MTIBC, 2020). Materiale brukt til grusdekke, bærelag og forsterkningslag skal testes etter standardiseringen for grove fraksjoner i ASTM D6928-17 (ASTM, 2017). Øvre grenseverdi for micro-Deval-verdien avhenger av flere parametere. For grusdekker, bærelag med øvre kornstørrelse 25 og 50 mm og forsterkningslag er kravet ≤ 25 eller ≤ 30 avhengig av permeabiliteten til materialet. For bærelag med øvre kornstørrelse 75 mm er kravet til $M_{DE} \leq 17$. Det stilles også krav til materialer brukt i asfaltdekker. Kravet varierer for bruksområde og er enten ≤ 18 eller ≤ 20 .

USA

Også i USA er vegmyndighetene fordelt på de ulike statene. Micro-Deval er ikke en veldig utbredt test i USA (Richard og Scarlett, 1997). Los Angeles-testen er derimot mye mer vanlig. Ettersom det enkelte steder i landet brukes piggdekk, benyttes også kulemølletesten.

Et eksempel på dette kan ses i Alaska, som setter makskrav for kulemølletesten på 8 (ADOT, 2020). Det stilles også krav til Los Angeles. For steinmaterialer til bruk i bituminøse lag er kravet ≤ 45 , mens det lenger ned i overbygningen økes til ≤ 50 . Washington State stiller også krav til Los Angeles. De respektive kravene for bituminøse lag og mekanisk stabiliserte lag er ≤ 30 og ≤ 40 (WSDOT, 2020).

2.3 Modifikasjoner av micro-Deval

Det er flere parametere som inngår i gjennomføring med micro-Deval-metoden. Deriblant kornstørrelse, stålkuler og rotasjonstid. Andre faktorer kan også påvirke massetapet som forekommer av testen. Eksempler på dette er veieprosedyren og om testeksemplaret tilføres vann eller ikke. I dette delkapittelet ses det på hvordan litteraturen har evaluert hvordan endringer i disse parametere har påvirket utfallet av testmetoden.

2.3.1 Kornstørrelse

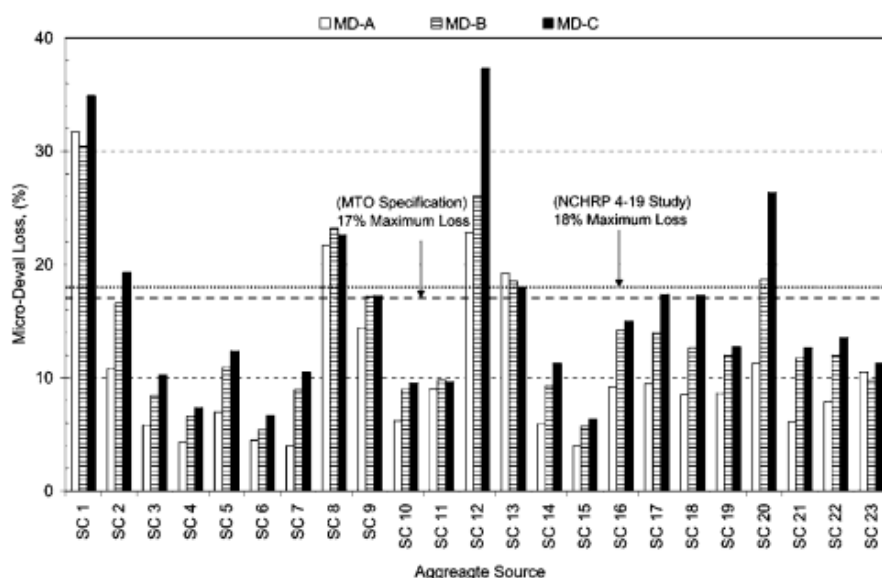
I delkapittel 2.2.2 ble det beskrevet en micro-Deval-metode for finkornet materiale som er angitt i ASTM-standardene. Denne metoden benyttet Hossain et al. seg av for å se om det var noen sammenheng mellom resultatene fra metoden og erfaringsbasert evaluering av materialer (Hossain, Lane og Schmidt, 2008a). De brukte totalt ti forskjellige materialer, derav ble fire klassifisert som gode, to som tvilsomme og fire som dårlige. Resultatene viste at gjennomsnittlig verdi for de to tvilsomme var lavere enn for de gode, men alle disse seks materialene opplevde mellom 11 og 18% vekttap. To av de dårlige materialene oppnådde verdier i det samme område, mens de resterende to hadde et vekttap på over 20%. Hossain et al. konkluderte med at denne metoden var tilstrekkelig for å klassifisere finkornet materiale.

Europeisk litteratur velger også å benytte seg av denne nordamerikanske testmetoden for fine korn. Dette begrunnes med at de europeiske standardene er tilpasset fine korn (Fournari og Ioannou, 2019). Mye litteratur støtter en slik tankegang. Erichsen har ved to anledninger anbefalt å benytte micro-Deval-varianten ment for jernbaneballast til bærelag og forsterkningslag fordi testfraksjonen som benyttes inngår i disse overbygningsslagene

(Erichsen, 2006; 2014). Strzałkowski og Kaźmierczak stiller også spørsmål ved testfraksjonen, ettersom de påpeker at en fraksjon ikke nødvendigvis innehar de samme egenskapene som en annen fraksjon av det samme steinmaterialet (Strzałkowski og Kaźmierczak, 2021). Rangaraju og Edlinski hadde også denne mistanken. Derfor gjennomførte de testmetoden etter ASTM-standardene for grove fraksjoner (Rangaraju og Edlinski, 2008). Som vist i Tabell 2.9 kan denne metoden testes for tre ulike fraksjoner. Ved å teste 23 materialer for alle disse tre fraksjonene kom de frem til resultatene i Figur 2.3. I figuren refererer MD-A til 9.5/19 mm, MD-B til 4.75/12.5 mm og MD-C til 4.75/9.5 mm. Ut fra figuren kommer det frem, med noen unntak, at vekttapene er størst for MD-C og minst for MD-A. Resultatene viste altså økende M_{DE} ved minkende kornstørrelse. Ut fra disse resultatene konkluderte de med at det er viktig å spesifisere hvilken fraksjon som skal testes når det settes krav til micro-Deval.

Gökalp et al. oppnådde motsatt resultat fra Rangaraju og Edlinski angående sammenhengen mellom M_{DE} og kornstørrelse (Gökalp, Uz og Saltan, 2016). De sammenlignet alle tre variantene med den europeiske metoden. I denne undersøkelsen ble det benyttet seks naturlige materialer og fire biprodukter. Ved å se isolert på de ulike testfraksjonene i ASTM-gjennomføringen, viser Figur 2.4 en klar trend med økende M_{DE} ved økende kornstørrelse for naturlige materialer. Denne trenden synes ikke for biprodukter. Videre viser figuren at ni av ti materialer oppnådde høyest verdi ved bruk av den europeiske metoden.

En annen artikkel viser også at ved økende kornstørrelser øker massetapet (Tanyu, Yavuz og Ullah, 2017). I dette tilfellet benyttes ikke stålkuler, men abrasjonen kommer fra sammenstøt mellom partiklene selv. Disse resultatene ble sammenlignet med de samme fraksjonene, men med stålkuler tilsatt. Her var resultatene mye jevnere for de ulike fraksjonene.



Figur 2.3 – Resultater for ulike testfraksjoner (Rangaraju og Edlinski, 2008)

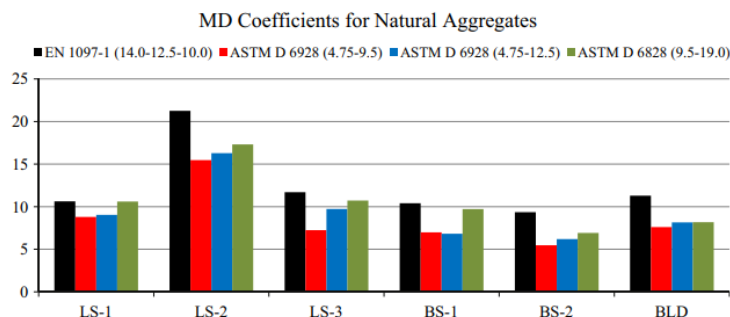


Fig. 2. MDC_{Avg} for Natural Aggregates.

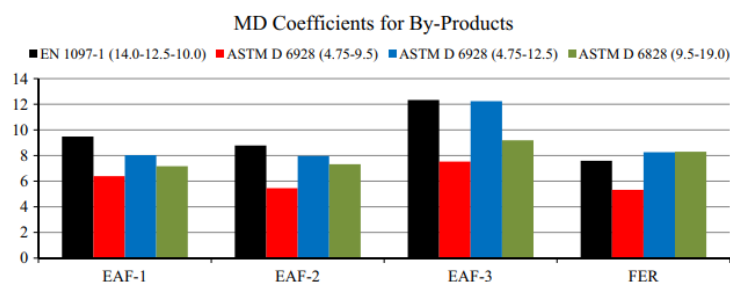


Fig. 3. MDC_{Avg} for By-Products.

Figur 2.4 – Resultater for ulike testfraksjoner (Gökalp, Uz og Saltan, 2016)

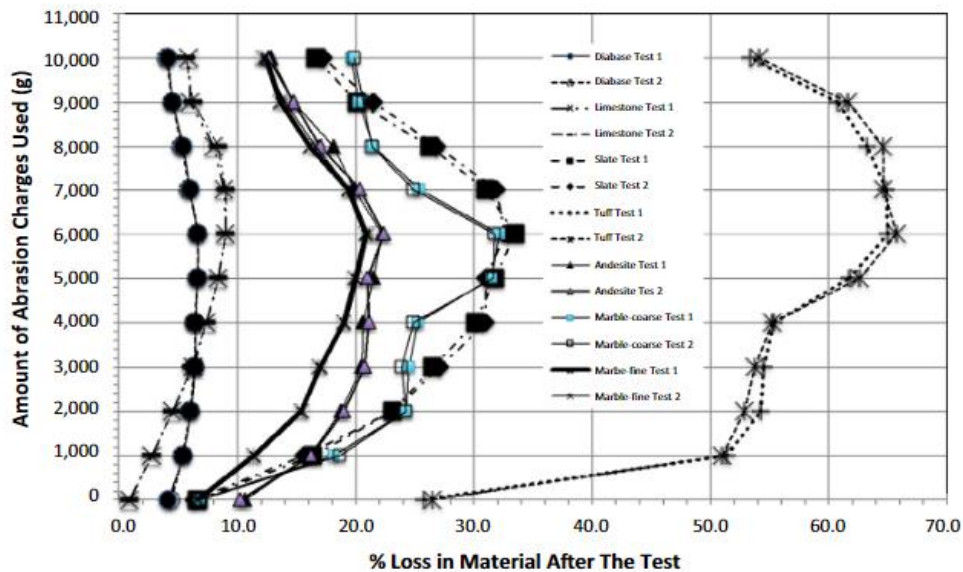
Også en annen undersøkelse av Hossain et al. fra 2008 viste et eksempel på at det kunne være lurt å gjøre forskjell på ulike fraksjonstørrelser. Også denne gangen sammenlignet de verdier fra micro-Deval med forhåndsbestemt materialkvalitet (god, tvilsom eller dårlig) på materialer fra Virginia, USA (Hossain, Lane og Schmidt, 2008b). Forskjellen på denne undersøkelsen var at de benyttet seg av micro-Deval-metoden for grove fraksjoner etter ASTM-standardene, med øvre kornstørrelse 19 mm og massefordeling etter Tabell 2.9. Et av materialene som ble benyttet for grove fraksjoner ble også benyttet for fine. Det viste seg at massetapet for materialet var mye større da det ble testet for fine korn enn for grovere. De nevner dog at en mulig forklaring på dette er at materialet besto av to relativt myke mineraler, hvor det mykeste kan ha blitt most ned i nedknusningsprosessen. Resultatene fra undersøkelsen tyder på at det er bedre sammenheng mellom micro-Deval og forhåndsbestemt kvalitet for grove enn for fine fraksjoner. Alle fire dårlige, samt ett av seks tvilsomme materialene oppnådde en micro-Deval-verdi høyere enn 15. Alle 10 gode materialer oppnådde en verdi lavere enn dette.

Et pågående prosjekt i Sverige jobber med en modifisert metode av micro-Deval for borekaks med fraksjon 2.8/4 mm (Artursson, Englund og Stenlid, 2022). Testeksemplarets vekt holdes konstant på 500 g og kulestørrelsen er den samme som for standard micro-Deval, mens trommeltid og total kulevekt er modifisert. Følgene ulike kombinasjoner ble prøvd: 1000 g kuler for en og to timer, 500 g kuler for 30 minutter og 2000 g kuler for en time. Det ble det bestemt å bruke 500 g kuler og 30 minutter kjøretid videre i arbeidet.

2.3.2 Abrasjonsmateriale

Det er ulike måter å endre abrasjonsmateriale på slik at testmaterialet utsettes for ulik slitasje. Her vil det bli sett på hvordan endring i abrasjonsvekten påvirker resultatene i micro-Deval.

For micro-Deval tilpasset jernbaneballast tilsettes ikke stålkuler i det hele tatt (CEN, 2011). En slik tilnærming tok også Tanyu et al. da de undersøkte forskjellige kornstørrelser med og uten stålkuler. De ulike fraksjonene som ble benyttet var 9.5/12.5 mm, 12.5/16 mm, 16/19 mm og 19/25 mm (Tanyu, Yavuz og Ullah, 2017). For alle fraksjonene ble andel vekttap større med stålkuler enn det gjorde uten kulene. Videre ble det benyttet en konstant fraksjon på 9.5/19 mm for syv ulike materialer, mens vekten av kulene ble variert mellom 0 og 10 kg. Resultatene kan ses i Figur 2.5. Figuren viser at 6 kg stålkuler konsekvent gir høyeste massetap. Ved høyere andel kuler, vil det bli mindre rom for bevegelse innad i trommelen og kulene vil mye mer slå mot hverandre.



Figur 2.5 – Resultater for ulik total kulevekt (Tanyu, Yavuz og Ullah, 2017)

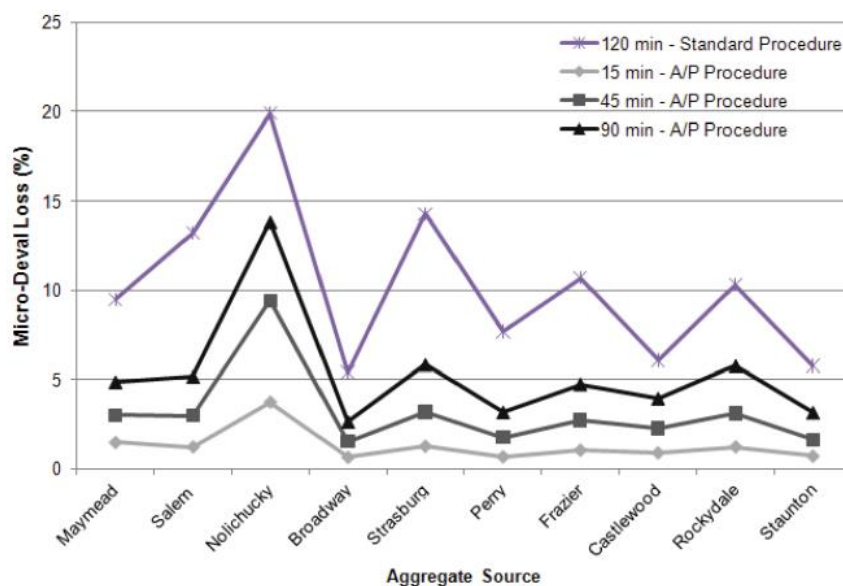
Det er ikke bare stålkulene som står for slitasje på materialet i trommelen, men også materialet selv (Quintanilla *et al.*, 2017). De så på testing av jernbaneballast etter EN-1097-1 (CEN, 2011). Ved å anta total uelastisk kollisjon mellom materialene og ved å bruke friksjonskoeffisienter mellom korn-korn og korn-trommel på henholdsvis 0,8 og 0,4 (fra empiriske data) simulerte de seg frem til at friksjonsarbeidet er høyere mellom kornene enn mellom korn og trommel. Videre skriver Lane et al. at mer kantet materiale vil slite mer på hverandre enn runde (Lane *et al.*, 2011).

2.3.3 Rotasjonstid og veieprosedyre

Det er logisk å tenke at jo lengre en prøve slites i trommelen, desto mer slitasje opplever prøven. I dette delkapittelet ses det på litteratur som har prøvd å finne sammenhengen mellom antall rotasjoner og massetap i micro-Deval, samt hvordan selve veieprosedyren påvirker resultatene.

For å finne ut hvordan ulike rotasjonstider påvirket micro-Deval-verdien for et materiale, brukte Lane et al. standard micro-Deval i henhold til ASTM for grove fraksjoner, sammen med tre ulike kjøretider for en modifisert metode av testen (Lane *et al.*, 2011). Den modifiserte metoden besto av å bruke 300 g grovt materiale sammen med 200 g abrasiv sand, 1250 g stålkuler og 0,75 liter vann. Den ble kjørt på rotasjonstidene 15, 30 og 45 minutter. Figur 2.6 viser de ulike verdiene for ulike materialer og kjøretid. Figuren viser klart at økende rotasjonstid gir økende massetap. Grafen viser også at det er en korrelasjon mellom metodene, ettersom de har topp- og bunnpunkt på de samme stedene.

I tillegg er de samme materialene som er over/under en grense på 10% massetap for standard metode, over/under en grense på 4,5, 2,5 og 1% for henholdsvis 90, 45 og 15 minutter kjøretid for den modifiserte metoden.

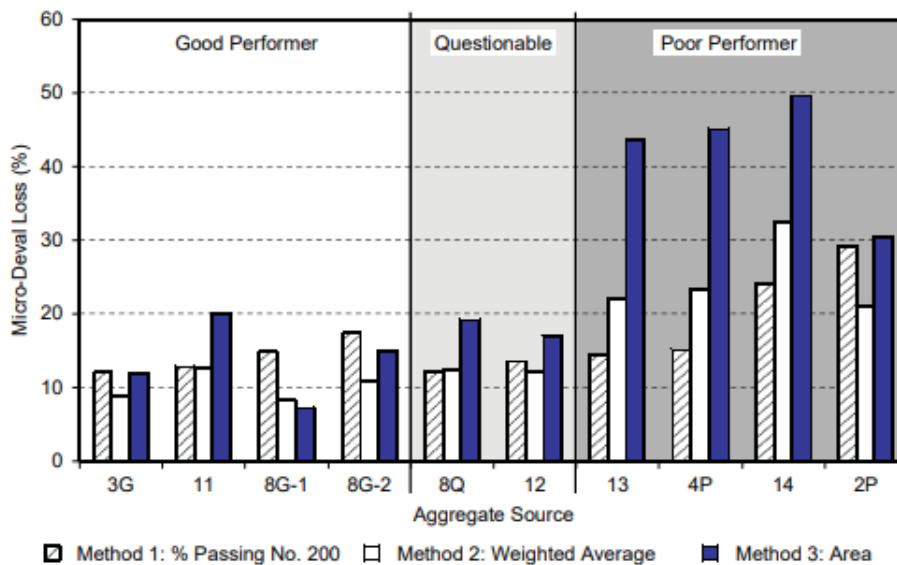


Figur 2.6 – Resultater for ulike kjøretider (Lane et al., 2011)

Etter at Tanyu et al. fant at en total kulevekt på 6 kg ga høyest massetap for samtlige materialer, brukte de dette videre for å finne en sammenheng mellom rotasjonstid og massetap. De kom frem til at en slik sammenheng var lineær for samtlige materialer (Tanyu, Yavuz og Ullah, 2017). Videre argumenterer de for at en endring til 6 kg stålkuler vil være ønskelig ettersom en slik abrasjonsvekt skaper lineær sammenheng, og at dette kan spare tid ved at det går an å regne seg frem til M_{DE} ved ønsket antall omdreininger. Rangaraju og Edlinski fant derimot ikke en lineær sammenheng mellom rotasjoner og M_{DE} , men heller en avtagende økning med økende rotasjoner (Rangaraju og Edlinski, 2008). Denne trenden opplevde også Quintanilla et al. ved å veie materialer for bestemte intervaller (Quintanilla et al., 2017). For både toppkvalitets- og vanlige materialer ble finstoffproduksjonen over dobbelt så stor de første 20 kontra de siste 20 minuttene. Wu et al. kom også fremt til en avtagende sammenheng mellom antall rotasjoner og massetap (Wu et al., 2018). De testet for to materialer, kvartsitt og gneis, og fikk en R^2 -verdi på over 0,99 for en slik sammenheng for begge materialene. Denne trenden er nokså lik som Rangaraju og Edlinski og Quintanilla et al. observerte. En forskjell mellom disse forfatterne var at de hadde ulike måleintervaller. Tanyu et al. hadde avlesninger hver 2000 rotasjon opp til 12 000, mens resten hadde flere målepunkter. Dette inkluderer også området mellom 0 og 2 tusen rotasjoner, altså området hvor de beskriver den mest ikke-lineære utviklingen i finstoffproduksjon.

Både Rangaraju og Edlinski, Quintanilla et al. og Wu et al. la materialene tilbake i trommelen etter bortsikting av finstoffet som ble produsert. Dette gjør at det ikke akkumuleres knust materiale gjennom hele kjøretiden, noe som kan påvirke det totale massetapet (Rangaraju og Edlinski, 2008). Derfor sammenlignet Rangaraju og Edlinski de verdiene de fikk for M_{DE} for et svakt og et sterkt materiale med verdiene for de samme materialene, men at de fikk akkumulert finstoffproduksjonen i trommelen. Det viste seg at slik endring i veieprosedyren utgjorde en vesentlig forskjell for det svake materialet, men ikke for det sterke. For det svake materialet reduserte det akkumulerte finstoffet

massetapet, mens det ikke ble observert en merkbar forskjell for det bedre materialet. Også Hossain et al. har sett på nye måter for veieprosedyre (Hossain, Lane og Schmidt, 2008a). I denne undersøkelsen sees det på finkornet materiale som testes etter ASTM (ASTM, 2015). Vanlig prosedyre går ut på å finne masseprosenten som blir mindre enn 0.075 mm (Method 1 i Figur 2.7), men de tester ut to nye metoder. Den ene tar utgangspunkt i et vektet gjennomsnitt (Method 2 i Figur 2.7) og den andre ser på forskjellen mellom kornkurven før og etter testing (Method 3 i Figur 2.7). Figuren viser at de nye metodene har en bedre sammenheng med de forhåndsbestemte kvalitetsklassene, da spesielt metode 3.



Figur 2.7 – Resultater for ulike veieprosedyrer (Hossain, Lane og Schmidt, 2008a)

2.3.4 Vann

En av forskjellene mellom ASTM og EN når det kommer til gjennomføring av micro-Deval er at det i ASTM stilles det krav til at prøven skal ligge en time i vann før testing. Et slikt krav er ikke å finne i europeisk standard. For å sjekke om en slik praksis har innvirkning på resultatet gjennomførte Hossain et al. micro-Deval for tolv ulike materialer. Materialene ble testet etter å ha ligget i 1 og 24 timer i vann før testing. Resultatene viste at tidsforskjellen i vann ikke hadde innvirkning på resultatet (Hossain, Lane og Schmidt, 2008a). I sin doktorgradsavhandling, kom Nålsund fram til at det å legge materialene i vann før testing ikke hadde innvirkning på micro-Deval-verdien (Nålsund, 2014).

Som nevnt i avsnitt 2.2.2 er en alternativ metode av micro-Deval å teste under tørre forhold. Stenlid sammenlignet resultatene fra å teste 10/14 mm-fraksjonen våt mot tørr for 51 prøver (Stenlid, 2000). Resultatene viste en korrelasjonskoeffisient på 0,76 med en sammenheng som beskrevet ut fra følgende formel:

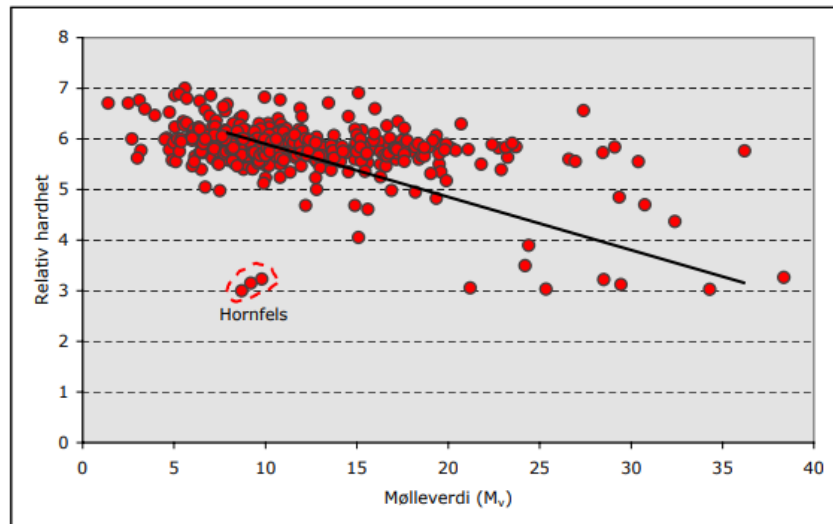
$$M_{DETørr} = 0,1422 M_{DE} + 2,3332$$

2.4 Geologisk påvirkning

Det er ikke bare de ulike bestanddelene av micro-Deval som påvirker verdien. Noe som har minst like mye å si er materialet som testes. Mineralsammensetningen har for eksempel mye å si for materialkvaliteten (Fournari og Ioannou, 2019), som vil lede til at ulik mineralogi vil oppleve forskjellig polering (Ortiz og Mahmoud, 2014). Materialets

hardhet er betydelig utslagsgivende for dets micro-Deval-verdi. Capik og Yilmaz konstaterte at en høyere hardhet ga lavere M_{DE} (Capik og Yilmaz, 2017). Dette stemmer overens med Figur 2.8, som viser sammenheng mellom hardhet og mølleverdi. Ettersom mølleverdi og micro-Deval-verdi er sterkt korrelerende vil denne sammenhengen også gjelde for micro-Deval (Erichsen, Ulvik og Sævik, 2011). M_{DE} kan beskrives ut fra A_N med en korrelasjonsverdi på 0,95 ut fra følgende formel (Erichsen, 2013):

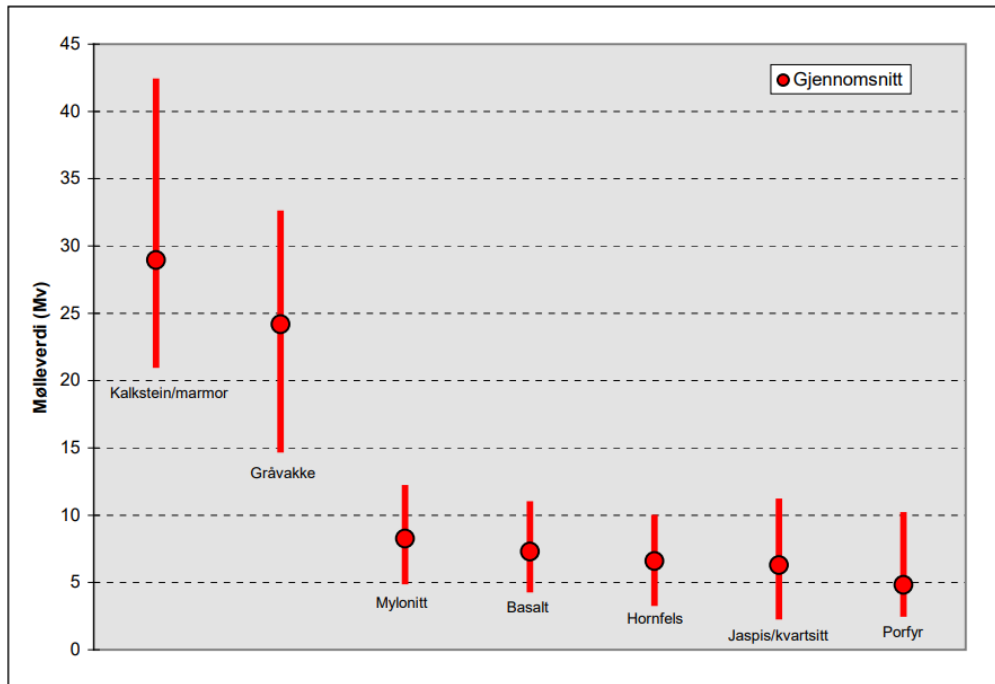
$$M_{DE} = 0,7948 A_N - 0,8281$$



Figur 2.8 – Sammenheng mellom hardhet og mølleverdi (Ulvik og Erichsen, 2006)

Materialer kan også klassifiseres etter Mohs hardhetsskala, der lavere tall indikerer mykere materiale. Eksempelvis har kvarts en verdi på 7, feltspat en verdi på 6 og glimmer en verdi på 3 (Ulvik og Erichsen, 2006). Med tanke på denne rangeringen vil altså materialer med høyt kvartsinnhold få lav M_{DE} , mens verdier med høyt glimmerinnhold gi høy M_{DE} . Flere forfattere har oppnådd resultater som støtter dette (Adomako *et al.*, 2021; Hossain, Lane og Schmidt, 2008b; Nålsund, 2014; Takarli, Phelipot-Mardele og Prince, 2009; Wu *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2015). Adomako *et al.* påpeker også at et høyt feltspatinnhold vil senke micro-Deval-verdien, noe som stemmer godt overens med hardhetsrangeringen til feltspat. Rangeringen stemmer også fint med deres resultat om at et glimmerinnhold på over 15-20% øker massetapet. Nålsund legger til at et kvartsittinnhold på over 20% vil ha en positiv innvirkning på M_{DE} . Nålsunds data underbygger Adomako *et al.* sine resultater om at høy andel myke mineraler øker massetapet.

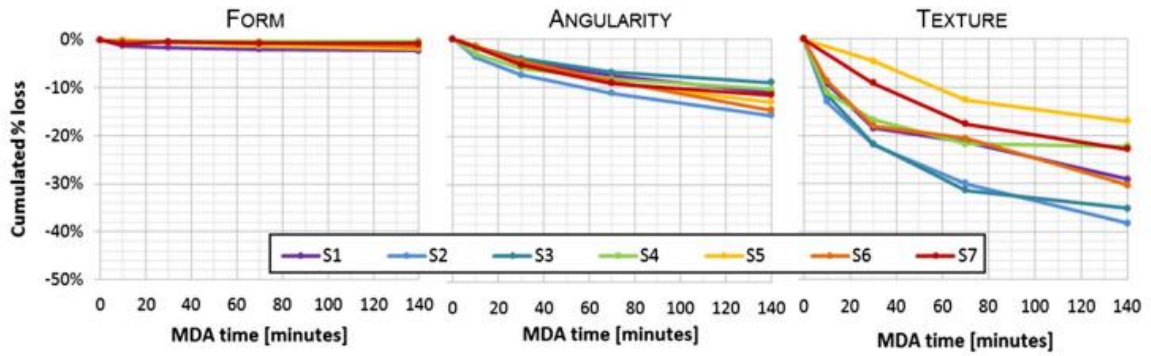
Hossain *et al.* bruker også denne teorien til å forklare noen av resultatene deres. De sammenlignet materialers massetap i micro-Deval med forhåndsbestemte klassifiseringer. Resultatene viste at totalt fire materialer som hadde klassifiseringen «tvilsom» oppnådde bedre verdi enn gjennomsnittet for de gode materialene. Hvorav 3 av disse inneholdt i hovedsak de harde mineralene kvarts og feltspat (Hossain, Lane og Schmidt, 2008b). En slik forklaring passer også fint inn med Figur 2.9. Figuren viser at gråvåkke, som inneholder mye myke mineraler, har høy mølleverdi, mens kvartsitt, som inneholder mye av det sterke mineralet kvarts, har lav. De røde punktene angir gjennomsnittsverdien, mens strekene angir hele spekteret av verdier.



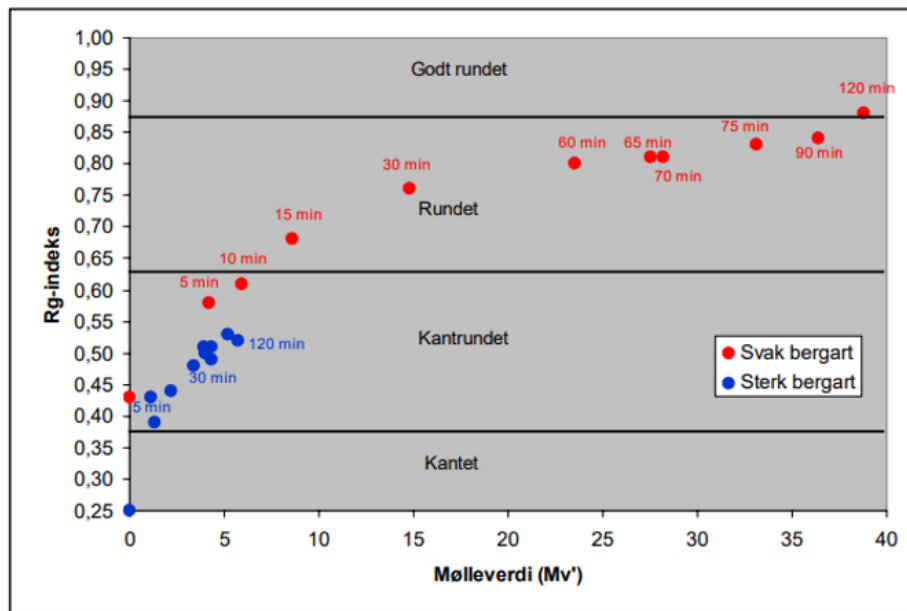
Figur 2.9 – Mølleverdi for ulike bergarter (Ulvik og Erichsen, 2006)

I tillegg til mineralsammensetningen har størrelse, form og arrangement av korn påvirkning på slitasjen til materialet (Strzałkowski og Kaźmierczak, 2021), selv om mineralogien har mer å si enn kornform (Cook, Tanyu og Yavuz, 2017). Lang et al. sine resultater tyder på det samme ettersom de ikke fant noen spesiell korrelasjon mellom kornform og M_{DE} (Lang et al., 2007). Quintanilla et al. fant ut at selve kornformen endret seg mindre enn både kantetheten og teksturen til materialet (Quintanilla et al., 2019; Quintanilla et al., 2017). Figur 2.10 viser disse resultatene. De påpeker også at det er skarpe kanter som er mest utsatt for slitasje og at det er de som forsvinner først, men når disse forsvinner oppnår materialet større slitasjemotstand. Resultatene til flere forfattere underbygger dette (Adomako et al., 2021; Strzałkowski og Kaźmierczak, 2021; Wang et al., 2015). Adomako et al. legger også til at slitasjemotstanden er større for materialer med finkornet tekstur, kontra grovkornet. Lane et al. sine resultater om at grovkornet materiale sliter mer på hverandre enn runde korn passer også godt inn med resten av forfatternes funn (Lane et al., 2011). Figur 2.11 viser hvordan et sterkt og et svakt materiale endrer kantetheten sin i løpet av en kulemølletest (Ulvik og Erichsen, 2006). Figuren viser at det svake materialet blir godt rundet etter ferdig test, samt oppnår en mye høyere kulemølleverdi enn det sterke materialet. Det sterke materialet holder derimot mye bedre på kantetheten sin.

Andre faktorer som kan øke micro-Deval-verdien er økende porøsitet og porettall (Capik og Yilmaz, 2017). Flisighet kan også ha en innvirkning (Benediktsson, 2015). I følge Benediktsson gir økende flisighetsindeks en liten økning i micro-Deval-verdi. Resultatene som Czinder og Török oppnådde viste derimot ingen sammenheng mellom disse parameterne (Czinder og Török, 2021).



Figur 2.10 – Endring i form, kantetethet og tekstur i løpet av micro-Deval (Quintanilla et al., 2019)



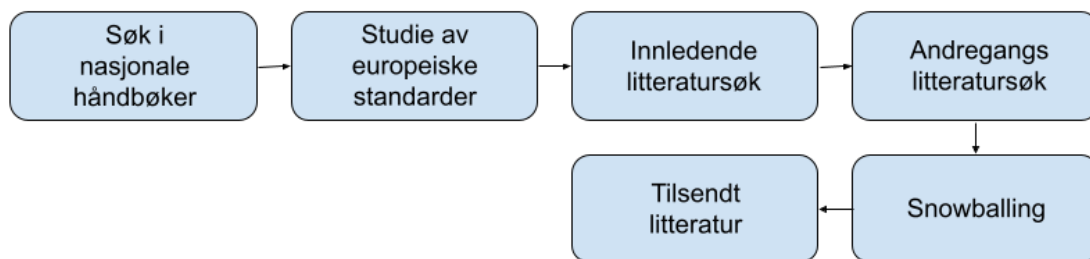
Figur 2.11 – Endring i kantetetheten til sterk og svakt materiale (Ulvik og Erichsen, 2006)

3 Forskningsmetode

I dette kapitlet beskrives metodene som er brukt for å skaffe informasjonen presentert i teorikapitlet. I tillegg til en beskrivelse av metodene som er benyttet for å få data til å gjennomføre analysene i oppgaven.

3.1 Litteratursøk

For å få en oversikt over tilstanden på forskningsområdet rundt temaet til denne oppgaven ble det foretatt et systematisk litteratursøk. Noe av litteraturen som presenteres i denne masteroppgaven er funnet i tilknytning til en tilhørende prosjektoppgave gjennomført høsten 2021. Figur 3.1 viser et overordnet flytskjema for hvordan søket har foregått.



Figur 3.1 – Flytskjema for litteratursøk

En god del av litteraturen er hentet fra håndbøker. Hovedandelen av disse er aktive eller tidligere norske håndbøker tilknyttet vegbygging. Det er også sett på krav og testmetoder fra andre land i verden. Denne litteraturen er funnet ved å gå inn på trafikkmyndighetenes side for de aktuelle trafikkmyndighetene, via snowballing eller tilsendt litteratur. Snowballing går ut på å se på siteringer i artikler eller andre dokumenter. De krav og retningslinjer som har blitt funnet og sett på som relevante, er presentert i delkapittel 2.2.

I Norge er europeiske standarder levert av Standard Norge og er tilgjengelige via abonnement hos dem. Gjennom NTNU og veileder har ønskelige standarder blitt tilgjengelige for gjennomgang. Høringsutkast for standard for micro-Deval som er under revisjon (prEN 1097-1) ble tilsendt fra veileder i Statens vegvesen. I utgangspunktet ble det sett på europeiske standarder som det er henvist til i Statens vegvesens håndbok N200. Videre ble det funnet flere relevante standarder ved bruk av snowballing senere i litteratursøket.

For publiserte artikler og rapporter har i hovedsak søketjenestene Oria og Scopus blitt brukt. I det innledende litteratursøket ble det gjennomført ulike søk for å finne ut hvor mange treff ulike søkeord ga. Disse søkene er representert i Tabell 3.1. For de søkestrengene som ikke ga for høyt antall treff, ble sammendrag for publikasjoner lest. Dersom sammendraget var relevant, ble utgivelsen notert.

Tabell 3.1 – Litteratursøk, innledende søk

Søkestreng	Treff Oria	Treff Scopus
Alle felt: micro-Deval AND history	825	28
Tittel: micro-Deval AND history	0	0
Tittel: micro-Deval AND alle felt: history OR origin	83	28
Tittel micro-Deval	46	36
Alle felt: micro-Deval AND fine aggregates	323	124
Tittel, sammendrag, nøkkelord: micro-Deval AND fine aggregates	-	12
Tittel, sammendrag, nøkkelord: micro-Deval AND coarse aggregates	-	23
Alle felt: Modified micro-Deval	9	21
Tittel, sammendrag, nøkkelord: Modified micro-Deval	-	6
Alle Felt: Los Angeles AND fine aggregates	1 731	488
Tittel, sammenfrag, nøkkelord: Los Angeles AND fine aggregates	-	20

Andregangssøket gikk ut på å benytte nye ord og uttrykk som kom frem etter å ha lest sammendrag og nøkkelord fra det innledende søket. Tabell 3.2 viser nye søkeord som ble funnet. Videre ble disse søkeordene brukt i forskjellige søkestrenger i Scopus. Disse søkestrengene kan sees i Tabell 3.3. I andregangssøket ble kun Scopus benyttet grunnet muligheten til å avgrense søket til tittel, sammendrag og nøkkelord og god mulighet til å sortere resultatene. Dersom antall treff overgikk 20, ble treffene sortert etter mest siteringer og de 20 øverste sett på. Om antallet treff overgikk 50, ble søkestrengen endret eller forkastet. Tallene i Tabell 3.3 refererer til de nummererte søkeordene i Tabell 3.2.

Tabell 3.2 – Litteratursøk, søkeord for andregangssøk

Nummer	Søkeord	Nummer	Søkeord
1	Wear	15	Degradation
2	Fragmentation	16	Durability
3	Resistance	17	Performance
4	Mechanical strength	18	Mineralogical analysis
5	Properties	19	Physicomechanical properties
6	Evaluation	20	Soundness
7	Abrasion	21	Polishing
8	Anti-abrasion	22	Alternative
9	Toughness	23	Modified
10	Morphology	24	Adjusted
11	Minerals	25	Micro-Deval
12	Grain size	26	Los Angeles
13	Crystal size	27	Los Angeles test
14	Grain shape	28	Nordic Mill

Tabell 3.3 – Litteratursøk, andregangssøk

Søkestreng	Treff Scopus
(25 OR 26 OR 28) AND (22 OR 23 OR 24)	2 597
(25 OR 27 OR 28) AND (22 OR 23 OR 24)	30
25 AND (1 OR 2)	50
25 AND (7 OR 8)	80
25 AND 4	5
25 AND (5 OR 6) AND 21	25
25 AND (15 OR 16)	64
25 AND (3 OR 16) AND 15	20
25 AND (3 OR 5 OR 16 OR 17) AND 12	5
25 AND (3 OR 5 OR 16 OR 17) AND 13	2
25 AND (3 OR 5 OR 16 OR 17) AND 14	2
25 AND 10	13
25 AND (18 OR 19)	3
25 AND 20	20

Neste steg i litteratursøket innebar å bruke teknikken snowballing. Referanser som ble funnet nyttig, relevant eller hyppig sitert ved gjennomgang av litteratur fra innledende- og andregangssøket ble notert og senere gjennomgått.

Veiledere fra Statens vegvesen har også bidratt med litteratur. Det har blitt tilsendt ulike artikler, rapporter og standarder mens arbeidet har foregått.

3.2 Materialer

Totalt ble 19 materialer benyttet i oppgaven. Dette er for å få nok data til å kunne gi pålitelige resultater. Materialene omfatter bergarter som er vanlige i pukkproduksjonen i Norge. Statens vegvesen har valgt ut materialer ved å benytte NGUs pukkdatabase (NGU, 2022b). Viktige faktorer var å ha nok sprik i verdier for Los Angeles, micro-Deval og glimmerinnhold. En annen faktor var å finne pukkverk som var i drift og mulighet for å få tilgang på materiale. De fleste materialene er også benyttet i en annen masteroppgave som det jobbes med parallelt med denne (Vinje, In prep.). Materiale M17 er valgt ut fordi micro-Deval-verdien skilte seg veldig ut. Alle materialene som er brukt i denne oppgaven er presentert i Tabell 3.4. I tillegg til forekomst, viser tabellen bergart for de ulike materialene. Den geografiske fordelingen av materialene vises i Figur 3.2. Figuren viser en god geografisk spredning av materialene, med litt større konsentrasjoner i Trøndelag og på Østlandet.



Figur 3.2 – Geografisk fordeling av materialene (figur: Arnhild Ulvik)

Tabell 3.4 – Materialer

Materialnavn	Bergart (NGU)	Forekomst
M1	Gråvakke	Lauvåsen
M2	Glimmerskifer	Auma
M3	Glimmergneis	Røyneberg
M4	Granodioritt	Jelsa
M5	Rombeporfyr	Bjønndalen
M6	Kvartsdioritt	Tau
M7	Porfyr	Stryken
M8	Gabbro/grønnstein	Vassfjell
M9	Gneis/mylonitt	Gullkista
M10	Glimmergneis	Bingsa
M11	Trondhemitt	Hyllestad
M12	Mylonitt	Ottersbo
M13	Anortositt	Rekefjord
M14	Arkose/sandstein	Lillehammer
M15	Gneis	Feiring
M16	Sandstein/hornfels	Buhammeren
M17	Fyllitt	Svølgja
M18	Kalkstein	Tromsdalen
M19	Ryolitt	Fossberga

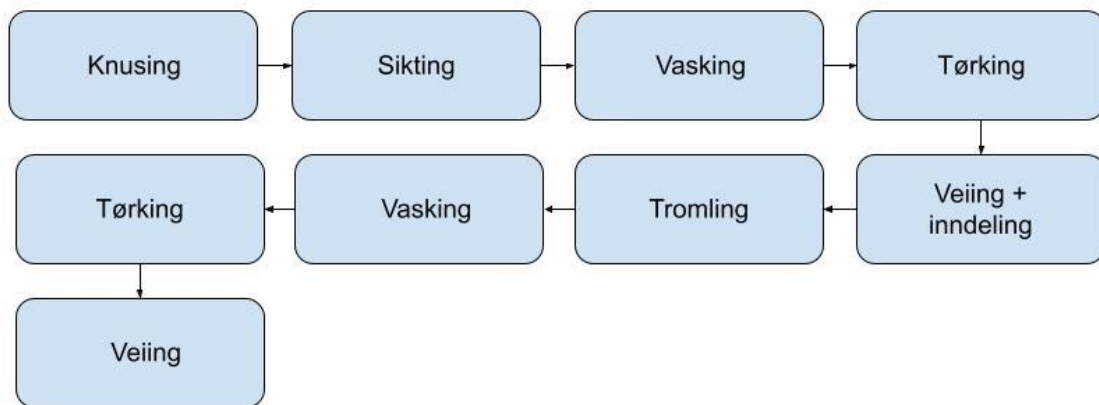
3.3 Datainnsamling

I dette delkapittelet beskrives gjennomføringen i laboratoriet for masteroppgaven. Planen kan deles opp i fem ulike alternativer av micro-Deval. Først gjennomføres micro-Deval etter standard metode og etter to metoder fra Annex C (CEN, 2011). Deretter etter en metode fra hver av Annex D og Annex E som beskrevet i prEN 1097-1 (CEN, 2021). Annex C beskriver micro-Deval-variasjoner som har små endringer i fraksjonstørrelser, mens Annex D og Annex E har større endringer. Gjennomføringen av alle disse fem ulike alternativene er beskrevet nærmere lengre ned i kapitlet. En oppsummering av forskjellene mellom disse gjennomføringsmetodene er gitt i Tabell 3.5, mens Figur 3.3 viser et generelt flytskjema som gjelder for samtlige gjennomføringsmetoder. For å få fine

fraksjoner for M17 måtte materialet knuses ned i en Los Angeles-trommel. De resterende materialene ankom laboratoriet ferdig nedknust.

Tabell 3.5 – Oppsummering spesifikasjoner for ulike gjennomføringsmetoder (micro-Deval)

	Standard	Annex C	Annex C	Annex D	Annex E
Testfraksjon [mm]	10/14	8/11.2	11.2/16	0.25/5.6	0.2/4(2)
Antall rotasjoner	12 000	12 000	12 000	1500	1500
Minste siktåpning [mm]	1.6	1.6	1.6	0.063	0.1
Mellomsikt [mm]	11.2	10	14	0.5-1-2-4	Ingen
Diameter stålkuler [mm]	10	10	10	10-30, se Tabell 3.9	10-30, se Tabell 3.11
Total vekt, stålkuler [g]	5000	4400	5400	2500	2500
Mengde, vann [liter]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Vekt, testeksemplar [g]	500	500	500	500	500
Koeffisient	M_{DE}	$M_{DE8/11}$	$M_{DE11/16}$	MM_{DE}	F_S



Figur 3.3 – Generelt flytskjema for micro-Deval

3.3.1 Standard micro-Deval (10/14 mm)

Utføringen av standard micro-Deval er utført etter EN 1097-1 (CEN, 2011). Denne metoden er også beskrevet i avsnitt 2.2.2.



Figur 3.4 – Tromler til micro-Deval

I tillegg til tromlene i Figur 3.4 og selve micro-Deval-apparatet vist i Figur 3.5, trengs følgende utstyr for gjennomføring av standard micro-Deval:

- **Vekt:** Må kunne veie materialet med en nøyaktighet på 0,1% av prøvens totale vekt.
- **Sikt:** Ønskelig testfraksjon må kunne siktes ut. Følgende siktstørrelser er benyttet for gjennomføring av standard micro-Deval: 1.6 mm, 8 mm, 10 mm, 11.2 mm, og 14 mm.
- **Varmeskap:** Steinmaterialene og testeksemplarene skal kunne tørkes på en kontrollert temperatur på (110 ± 5) °C.
- **Vaskeutstyr:** Steinmaterialene skal skylles med vann før innveiling og etter kjøring.
- **Abrasjonskuler:** Stålkuler med en samlet vekt på (5000 ± 5) g legges sammen med testeksemplaret i trommelen for å påføre prøven slitasje. Kulene skal ha diameter $(10 \pm 0,5)$ mm. En kule er vist i Figur 3.6.
- **Litermål:** Hver trommel skal inneholde $(2,5 \pm 0,05)$ liter vann ved kjøring. Dette må kunne måles.



Figur 3.5 – Apparat til micro-Deval



Figur 3.6 – Stålkuler til micro-Deval (Diametere fra venstre: 30, 18 og 10 mm)

For å forberede testeksemplarene, siktes steinmaterialene med siktestørrelsene gitt over. Deretter skylles og tørkes de ønskelige fraksjonsstørrelsene, her 10/11.2 mm og 11.2/14 mm. Hver test består av to testeksemplar. Der hver av disse skal ha en gitt massefordring innad i testfraksjonen. Denne oppgaven benytter en fordeling på 35/65%. Den totale vekten til et testeksemplar er (500 ± 2) g, som gir en massefordeling vist i Tabell 3.6. De nøyaktige verdiene for hver delfraksjon er vist i vedlegg 1.

Tabell 3.6 – Vektfordeling for standard micro-Deval

Fraksjon [mm]	Andel av total vekt [%]	Vekt [g]
10/11.2	35	175
11.2/14	65	325
Sum	100	500

I hver av tromlene plasseres (5000 ± 5) g stålkuler, et testeksemplar, og $(2,5 \pm 0,05)$ liter vann. Etter $(12\ 000 \pm 10)$ rotasjoner med hastighet (100 ± 5) rotasjoner i minuttet, vaskes hvert enkelt eksemplar på en 1.6 mm-sikt som er beskyttet av en 8 mm-sikt. Testeksemplaret vil nå bestå av steinstørrelser med fraksjon mellom 1.6 og 14 mm. Stålkulene plukkes ut, hele testeksemplaret legges på brett og tørkes i varmeskap. Etter at det har blitt tørket og avkjølt til romtemperatur, veies testeksemplaret. Denne vekten brukes til å regne ut micro-Deval-verdien, M_{DE} , etter ligningen:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5}$$

Der m er vekten av eksemplaret som ikke har passert 1.6 mm-sikten. Gjennomsnittsverdien til de to testeksemplarene i hver prøve gir micro-Deval-verdien til hvert materiale.

3.3.2 Annex C (8/11.2 mm og 11.2/16 mm)

Prinsippet for gjennomføring etter Annex C er lik som for standard gjennomføring. Forskjellene ligger i testfraksjon, siktstørrelser og antall kuler. Annex C gir muligheten til å benytte fem ulike testfraksjoner, men i denne oppgaven ses det kun på 8/11.2 og 11.2/16 mm. Mellomsiktene for disse fraksjonene er henholdsvis 10 og 14 mm. Det er krav til at 60-70% av massen skal passere mellomsiktene. I denne oppgaven er det prøvd å holde denne andelen så nære 65% som mulig. Vekten til kulene for 8/11.2 mm-fraksjonen reduseres til $(4\ 400 \pm 5)$ g, mens for 11.2/16 mm-fraksjonen økes den til $(5\ 400 \pm 5)$ g.

Vekten til et testeksemplar er det samme som for standard micro-Deval, altså (500 ± 2) g. Micro-Deval-verdien regnes ut etter samme ligning som standard micro-Deval. Tabell 3.7 viser en oppsummering av endringene for Annex C og Tabell 3.8 angir vektfordelingen for delfraksjonene for de to ulike testfraksjonene som er brukt i denne oppgaven. De nøyaktige verdiene vises i vedlegg 2 og 3.

Tabell 3.7 – Forskjeller mellom standard micro-Deval og Annex C

	8/11.2 mm	11.2/16 mm
Mellomsikt [mm]	10	14
Vektandel som skal passere [%]	60-70	60-70
Total kulevekt [g]	$4\,400 \pm 5$	$5\,400 \pm 5$

Tabell 3.8 – Vektfordelinger, Annex C

	Vektandel av testeksemplar [%]	Masse [g]
Vekt delfraksjon 8/10 [g]	65	325
Vekt delfraksjon 10/11.2 [g]	35	175
Sum	100	500
Vekt delfraksjon 11.2/14 [g]	65	325
Vekt delfraksjon 14/16 [g]	35	175
Sum	100	500

3.3.3 Annex D (0.25/5.6 mm)

I dette avsnittet beskrives hvordan micro-Deval gjennomføres i henhold til Annex D i prEN 1097-1 (CEN, 2021).

Prinsippet for gjennomføringen er lik som for standard micro-Deval, med unntak av noen parametere. Annex D bruker testfraksjon 0.25/5.6 mm og minste siktåpning 0.063 mm. Utstyret er likt som for standard micro-Deval, med unntak av siktåpninger, kulediameter og den totale vekten av stålkulene. Annex D benytter følgende siktåpninger: 0.063 mm, 0.25 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 5.6 mm og 8 mm. 8 mm-sikten benyttes til å samle stålkulene ved vasking etter kjøring. Kulediameterne er varierende og kan ses i Tabell 3.9.

Tabell 3.9 – Mengde og størrelse på stålkuler, Annex D

Diameter, stålkuler [mm]	Antall
$30 \pm 0,5$	9
$18 \pm 0,5$	21
$10 \pm 0,5$	Fyll på til total vekt er (2500 ± 5) g

Testfraksjonens totale vekt på (500 ± 3) g skal fordeles på ulike delfraksjoner. Denne fordelingen er vist i Tabell 3.10. Vedlegg 4 viser nøyaktige tall for vektfordelingen for alle materialer med unntak av M3 og M8. Vektfordelingen for disse materialene vises i vedlegg 6.

Tabell 3.10 – Vektfordeling, Annex D

Fraksjon [mm]	Masse [g]
4.0 – 5.6	60
2.0 – 4.0	140
1.0 – 2.0	115
0.5 – 1.0	85
0.25 – 0.5	100
Totalt	500

Annex D gjennomføres med samme rotasjonshastighet som standard micro-Deval (100 ± 5) rotasjoner pr. minutt, men antall rotasjoner er redusert til 1500 ± 10. Mengde vann er lik som i standard gjennomføring. Etter gjennomført test regnes den modifiserte micro-Deval-verdien, MM_{DE} , ut etter følgende ligning:

$$MM_{DE} = \frac{500 - m}{5}$$

Der m er vekten av eksemplaret som ikke passerer sikten på 0.063 mm etter tromling. Gjennomsnittsverdien av prøvens to testeksemplar gir micro-Deval-verdien for hvert materiale.

3.3.4 Annex E (0.2/4 mm)

I dette avsnittet beskrives hvordan micro-Deval gjennomføres i henhold til Annex E i prEN 1097-1 (CEN, 2021).

Prinsippet for gjennomføring er det samme som for standard micro-Deval, med unntak av noen parametere. Annex E benytter seg av fraksjonen 0.2/4 mm eller 0.2/2 mm og minste siktåpning 0.1 mm. Total vekt for testeksemplar er (500 ± 3) g. Ved gjennomføring etter denne metoden skal følgende siktstørrelser benyttes: 0.1 mm, 0.2 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm og 8 mm. 8 mm-sikten benyttes til å samle stålkulene ved vasking etter kjøring. Kulene skal ha diameter og total vekt som gitt i Tabell 3.11.

Tabell 3.11 – Mengde og størrelse på stålkuler, Annex E

Diameter [mm]	Antall	Total vekt [g]
30 +0,1/-0,5	9	925-985
18 +0,1/-0,5	21	440-500
10 ± 0,5	Fyll opp til total vekt er (2500 ± 4) g	-

Annex E gjennomføres med samme rotasjonshastighet og antall rotasjoner som Annex D. Etter gjennomført test regnes sprøhetstallet, F_s , ut etter følgende ligning:

$$F_s = \frac{500 - m}{5}$$

Der m er vekten til testeksemplaret som ikke passerer 0.1 mm-sikten etter gjennomført test. Gjennomsnittsverdien av prøvens to testeksemplar gir micro-Deval-verdien for hvert materiale.

Ettersom steinmaterialene som benyttes i vegbygging innehar hele spekteret fra 0.2 til 4 mm ble det besluttet å bruke denne fraksjonen fremfor 0.2/2 mm. Høringsutkastet spesifiserer heller ikke en massefordeling for delfraksjoner. Derfor ble materialene testet

for fraksjonen 0.2/4 mm uten å vite siktekurven innad i denne fraksjonen. Dette gir ikke nødvendigvis samme resultat som 0.2/2 mm-fraksjon eller en 0.2/4 mm-fraksjon med bestemt siktekurve. For å få en indikasjon på dette ble materialene M1 og M7 i tillegg testet på 0.2/2 og 0.2/4 mm-fraksjonen der halvparten av vekten var mindre enn 2 mm. Vedlegg 5 viser nøyaktige verdier for vektfordelingen for alle materialer med unntak av M3 og M8. Vektfordelingen for disse materialene vises i vedlegg 6.

3.3.5 Geologiske data

For å få et geologisk perspektiv på oppgaven har det blitt utvekslet data med en masteroppgave som skrives parallelt med denne (Vinje, In prep.). Vinjes oppgave benytter samme materialer som denne masteroppgaven. Data om kornkurve, andel myke mineraler, andel glimmer og en ikke-standardisert flisighet er mottatt, mens micro-Deval-verdier for standard gjennomføring, etter Annex D og Annex E sendt.

4 Resultater

I dette kapittelet presenteres resultatene av alle forsøkene som har blitt utført i denne masteroppgaven. Kapittelet er delt inn i delkapitler som viser resultater for de ulike micro-Deval-metodene. Alle metodene sees i sammenheng med resultatene fra testene utført med referansefraksjonen 10/14 mm. I tillegg er det utvekslet resultater med en parallelltgående masteroppgave som benytter de samme materialene (Vinje, In prep.). Derfra er det mottatt data om siktekurver for kornene < 4 mm, andel myke mineraler og en ikke-standardiser flisighet. Disse dataene sammenlignes også opp mot micro-Deval-metodene. Mer detaljerte verdier for alle testene er gitt i vedleggene.

Korrelasjonskoeffisienten, r , kan regnes ut etter følgende formel:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \right)$$

Der n er antall verdier pr. datasett, x_i og y_i er enkeltverdier, \bar{x} og \bar{y} er gjennomsnittet og S_x og S_y er standardavviket for de respektive datasettene. x og y representerer hvert sitt datasett. Tabell 4.1 gir en oppsummering av alle korrelasjonskoeffisientene som er funnet i analysene. I tabellen omtales andelen myke mineraler som A_{mm} .

Tabell 4.1 – Oppsummering, korrelasjoner

	M_{DE}	MM_{DE}	$FI_{0.8}$	A_{mm}	C_u
M_{DE}	-	0,697	-	0,908	-
$M_{DE8/11}$	0,995	-	-	-	-
$M_{DE11/16}$	0,996	-	-	-	-
MM_{DE}	0,697	-	0,334	0,789	0,489
MM_{DE}/M_{DE}	-0,877 ^[1]	-	-	-	-
F_s	0,855	0,855	0,525	0,804	0,590
F_s/M_{DE}	-0,858 ^[1]	-	-	-	-

^[1] Korrelasjonen er logaritmisk for disse sammenhengene, mens den er lineær for resten.

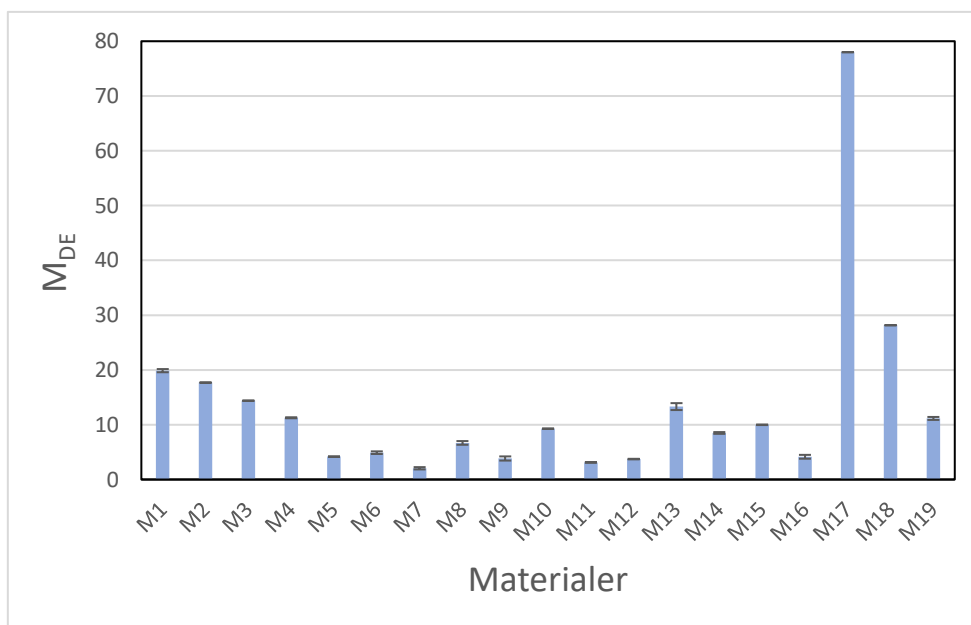
4.1 Standard micro-Deval (10/14 mm)

Micro-Deval-verdiene for alle 19 materialene er listet opp i Tabell 4.2 og visualisert i Figur 4.1. Resultatene viser at materialene generelt har god motstand mot slitasje. M17 er et materiale som skiller seg kraftig ut med sin verdi på 78. Testen ble utført en ekstra gang på dette materiale for å få forsikring om at verdien stemte. I tillegg oppnådde materialet en Los Angeles-verdi på omtrent 55. Stolpene i diagrammet viser til gjennomsnittsverdien for de to parallellene for hvert material, mens de sorte markørene viser maks- og minimumsverdi.

Tabell 4.2 – Resultater, standard micro-Deval - 10/14 mm (M_{DE})

Material	M_{DE} inkludert en desimal	M_{DE}
M1	19,9	20
M2	17,7	18
M3	14,4	14
M4	11,3	11
M5	4,2	4
M6	4,9	5
M7	2,1	2
M8	6,7	7
M9	3,8	4
M10	9,3	9
M11	3,1	3
M12	3,7	4
M13	13,3	13
M14	8,5	9
M15	10,0	10
M16	4,2	4
M17^[1]	-	78
M18	28,2	28
M19	11,2	11

^[1]Micro-Deval er utført av ekstern aktør



Figur 4.1 – Resultater, standard micro-Deval - 10/14 mm (M_{DE})

4.2 Annex C (8/11.2 mm og 11.2/16 mm)

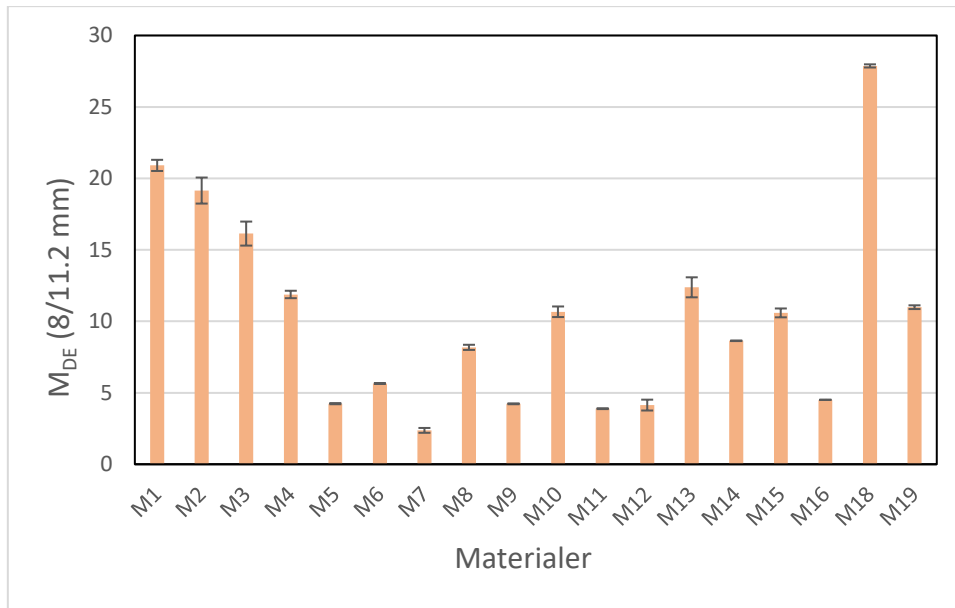
I dette delkapittelet fremlegges resultatene oppnådd etter testing i henhold til Annex C i EN 1097-1 (CEN, 2011). Materiale M17 er ikke testet etter denne metoden, og er derfor ikke med i delkapittelet. Tabell 4.3 og Figur 4.2 viser micro-Deval-verdiene etter testing på 8/11.2 mm. De sorte markørene i Figur 4.2 angir verdiene for de to ulike parallellene for hvert materiale. Ved å sette inn verdier fra Tabell 4.2 og Tabell 4.3 inn i korrelasjonsformelen gitt øverst i kapittel 4, blir korrelasjonen mellom M_{DE} og $M_{DE8/11}$ 0,995. Dette tilsvarer en R^2 -verdi på 0,99, som også kan sees i Figur 4.3. Med denne korrelasjonen tatt i betraktning, kan $M_{DE8/11}$ beskrives ut fra M_{DE} etter følgende formel:

$$M_{DE8/11} = 0,9978 M_{DE} + 0,5861$$

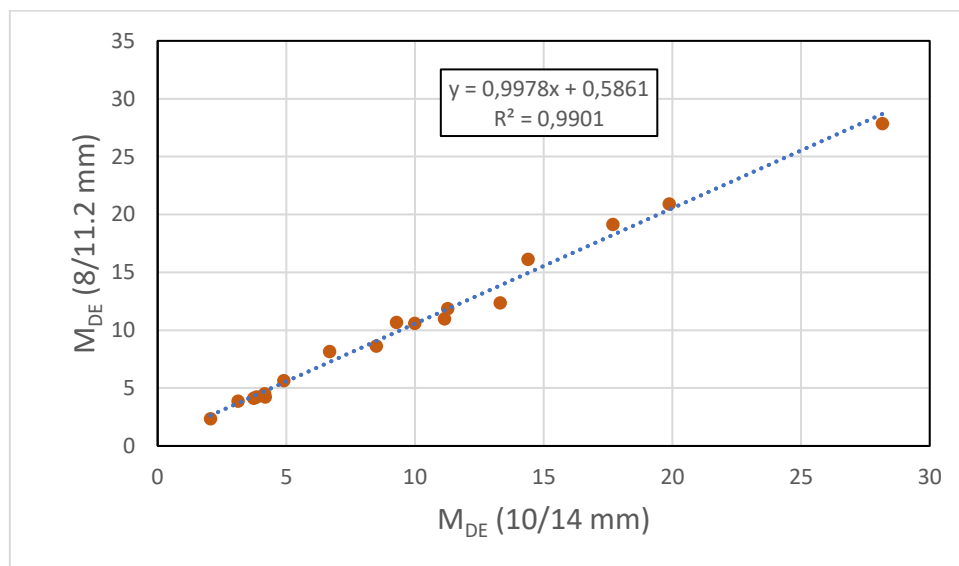
Tabell 4.3 – Resultater, Annex C - 8/11.2 mm ($M_{DE8/11}$)

Material	$M_{DE8/11}$ inkludert en desimal	$M_{DE8/11}$
M1	20,9	21
M2^[1]	19,2	19
M3	16,1	16
M4	11,9	12
M5	4,2	4
M6	5,7	6
M7	2,4	2
M8	8,2	8
M9	4,2	4
M10	10,7	11
M11	3,9	4
M12	4,1	4
M13	12,4	12
M14	8,6	9
M15	10,6	11
M16	4,5	5
M18	27,9	28
M19	11,0	11

^[1] For parallell 2 har 70% av vekten passert mellomstektet.



Figur 4.2 – Resultater, Annex C - 8/11.2 mm ($M_{DE8/11}$)



Figur 4.3 – Korrelasjon, 10/14 og 8/11.2 mm (M_{DE} og $M_{DE8/11}$)

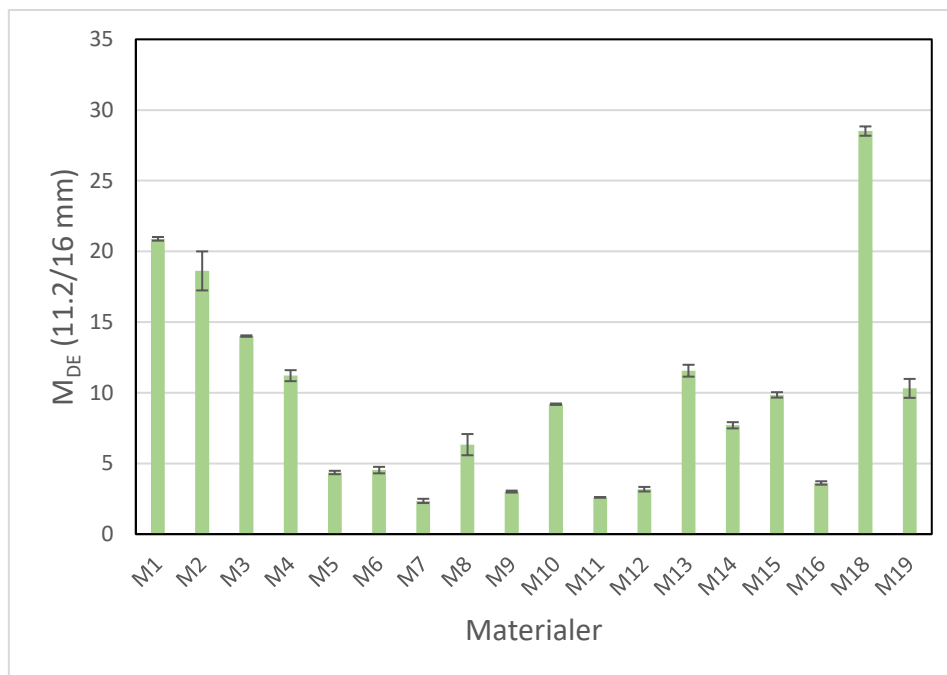
Tabell 4.4 og Figur 4.4 viser micro-Deval-verdiene etter testing på 11.2/16 mm. Ved å sette inn verdier fra Tabell 4.2 og Tabell 4.4 i korrelasjonsformelen gitt øverst i kapittel 4, blir korrelasjonen mellom M_{DE} og $M_{DE11/16}$ 0,996. Dette tilsvarer en R^2 -verdi på 0,99, som også kan sees i Figur 4.5. Med disse korrelasjonsverdiene tatt til betraktning kan $M_{DE11/16}$ beskrives ut fra M_{DE} etter følgende formel:

$$M_{DE11/16} = 1,0372 M_{DE} - 0,6101$$

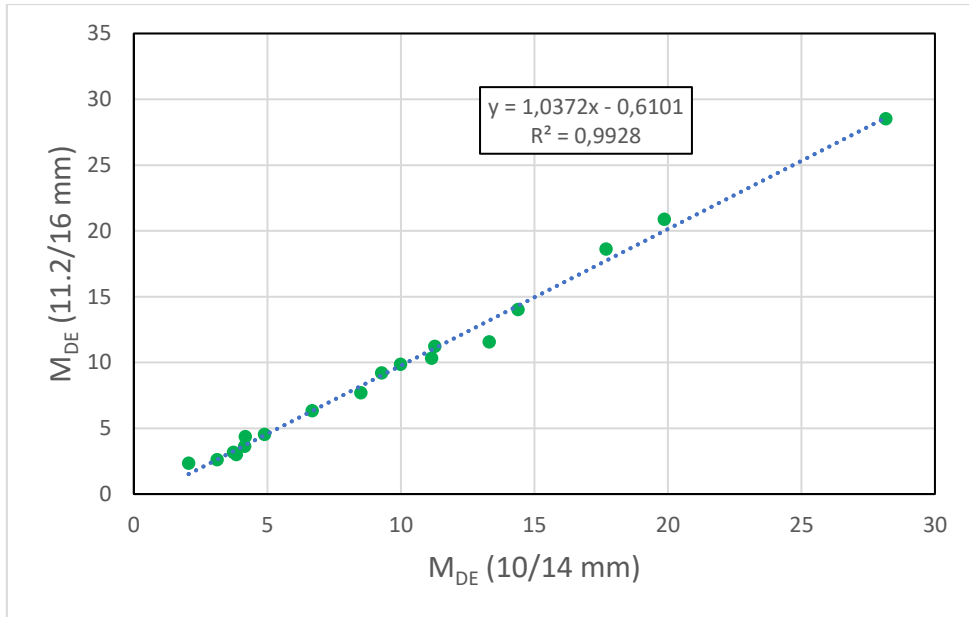
Figur 4.6 viser resultatene etter testing med referansefraksjonen 10/14 mm sammen med resultatene fra testing på fraksjonene 8/11.2 og 11.2/16 mm. De sorte markørene i Figur 4.4 og Figur 4.6 angir verdiene for de to ulike parallellene for hvert material.

Tabell 4.4 – Resultater, Annex C - 11.2/16 mm ($M_{DE11/16}$)

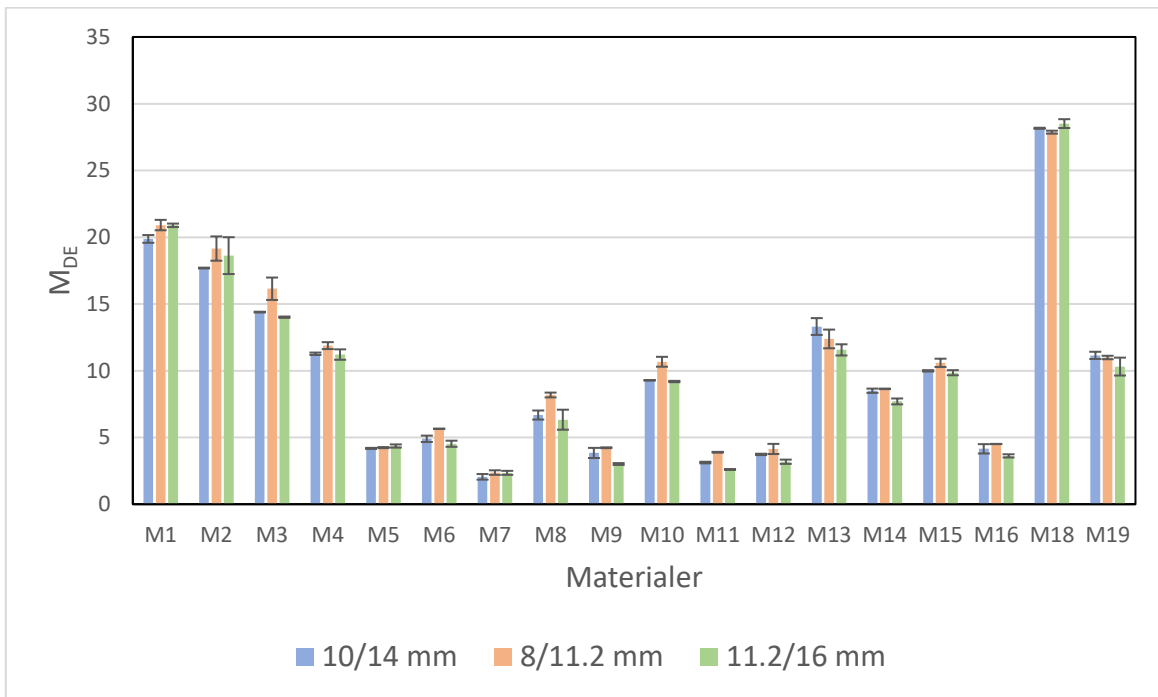
Material	$M_{DE11/16}$ inkludert en desimal	$M_{DE11/16}$
M1	20,9	21
M2	18,6	19
M3	14,0	14
M4	11,2	11
M5	4,4	4
M6	4,5	5
M7	2,4	2
M8	6,3	6
M9	3,0	3
M10	9,2	9
M11	2,6	3
M12	3,2	3
M13	11,6	12
M14	7,7	8
M15	9,9	10
M16	3,6	4
M18	28,5	29
M19	10,3	10



Figur 4.4 – Resultater, Annex C - 11.2/16 mm ($M_{DE11/16}$)



Figur 4.5 – Korrelasjon 10/14 og 11.2/16 mm (M_{DE} og $M_{DE11/16}$)



Figur 4.6 – Resultater, 10/14, 8/11.2 og 11.2/16 mm (M_{DE} , $M_{DE8/11}$ og $M_{DE11/16}$)

4.3 Annex D (0.25/5.6 mm)

Tabell 4.5 og Figur 4.7 viser micro-Deval-verdiene etter testing på 0.25/5.6 mm i henhold til Annex D i prEN 1097-1 (CEN, 2021). Figur 4.8 viser resultatene for denne testfraksjonen sammenlignet med resultatene for referansefraksjonen 10/14 mm. De sorte markørene i Figur 4.7 og Figur 4.8 viser verdiene for de to parallellene for hvert material.

Ved å sette inn verdier fra Tabell 4.2 og Tabell 4.5 inn korrelasjonsformelen gitt øverst i kapittel 4, blir korrelasjonen mellom M_{DE} og MM_{DE} 0,286. Dette tilsvarer en R^2 -verdi på 0,08, som også kan sees i Figur 4.9. Figuren viser at materiale M17 skiller seg ut fra resten. Det er dermed utført en analyse uten dette materialet, som kan sees i Figur 4.10. Ved å ekskludere avviksmaterialet endres korrelasjonen til 0,697 og R^2 -verdien til 0,49. Med disse korrelasjonsverdiene som utgangspunkt, kan MM_{DE} beskrives ut fra M_{DE} etter følgende formel:

$$MM_{DE} = 0,8802 M_{DE} + 11,283$$

Figur 4.11 viser den logaritmiske sammenhengen mellom micro-Deval verdien fra standard testing og forholdstallet mellom verdiene fra Annex D og standard test. Ved å sette inn $\ln(M_{DE})$ for x og MM_{DE}/M_{DE} for y blir den logaritmiske korrelasjonen mellom M_{DE} og MM_{DE}/M_{DE} lik -0,877, som tilsvarer en R^2 -verdi på 0,77. Med disse korrelasjonsverdiene som utgangspunkt kan MM_{DE}/M_{DE} beskrives ut fra M_{DE} etter følgende formel:

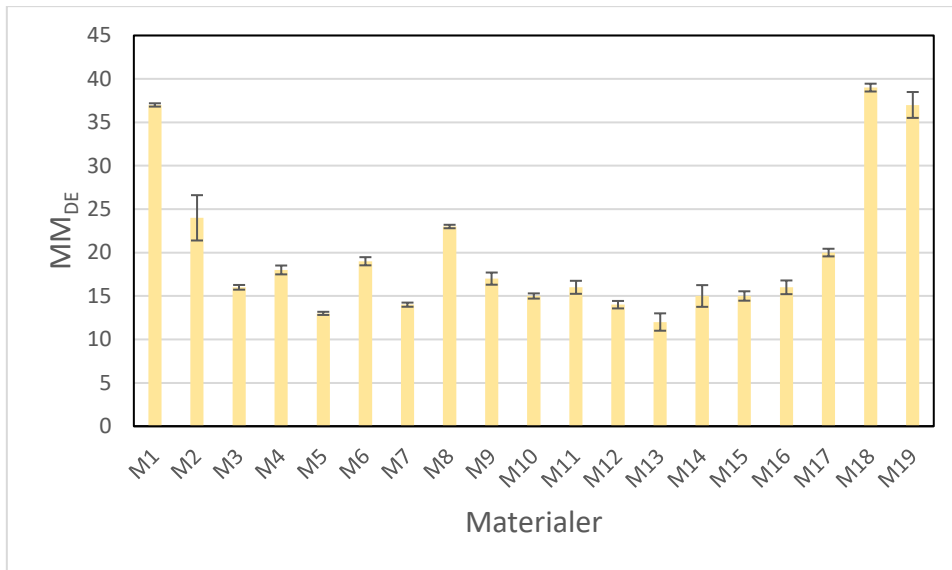
$$\frac{MM_{DE}}{M_{DE}} = -1,967 \ln(M_{DE}) + 6,8336$$

Tabell 4.5 – Resultater, Annex D (MM_{DE})

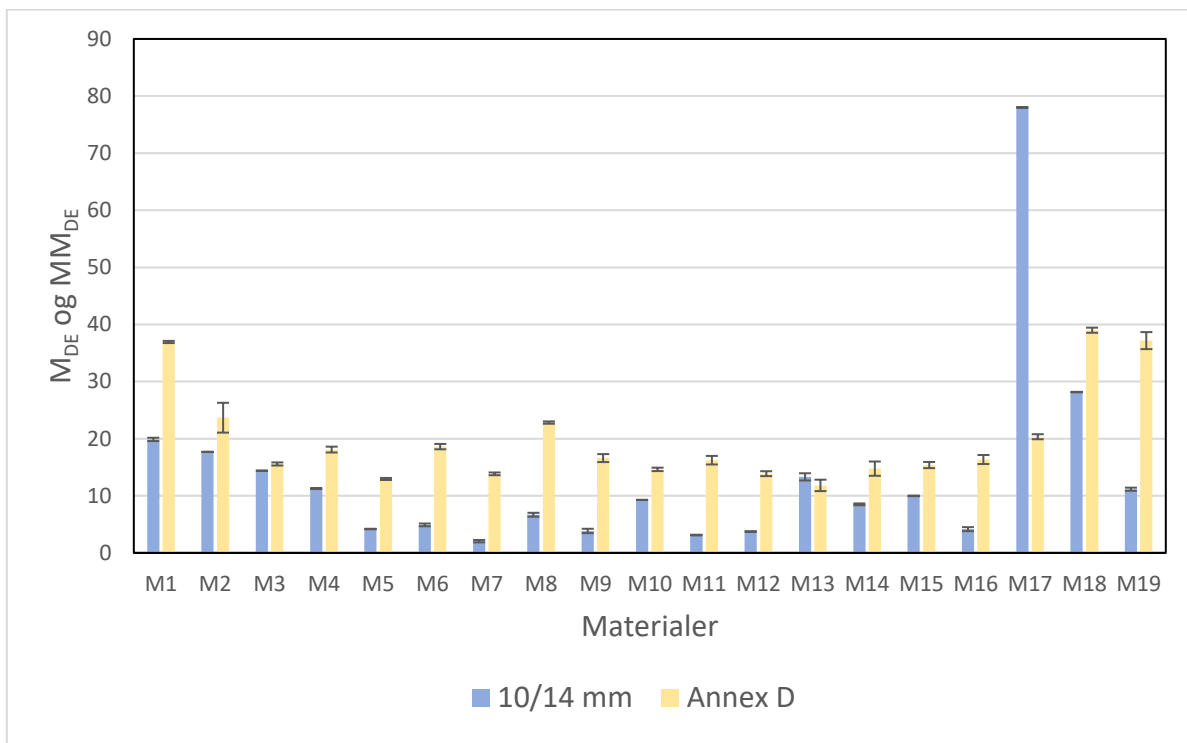
Material	MM_{DE} inkludert en desimal	MM_{DE}	MM_{DE}/M_{DE}
M1	36,9	37	1,9
M2	23,7	24	1,3
M3^[1]	15,6	16	1,1
M4	18,1	18	1,6
M5	12,9	13	3,1
M6	18,6	17	3,8
M7	13,8	14	6,8
M8^[1]	22,8	23	3,4
M9	16,6	17	4,3
M10	14,6	15	1,6
M11	16,2	16	5,2
M12	13,9	14	3,7
M13	11,8	12	0,9
M14	14,8	15	1,7
M15	15,4	15	1,5
M16	16,4	16	3,9
M17^[2]	20,3	20	-
M18	39,0	39	1,4
M19	37,2	37	3,3

^[1] Materialene var allerede siktet til en mer nøyaktig inndeling. Denne inndelingen har blitt benyttet til å sette sammen testeksemplarene. Nøyaktige verdier vises i vedlegg 6.

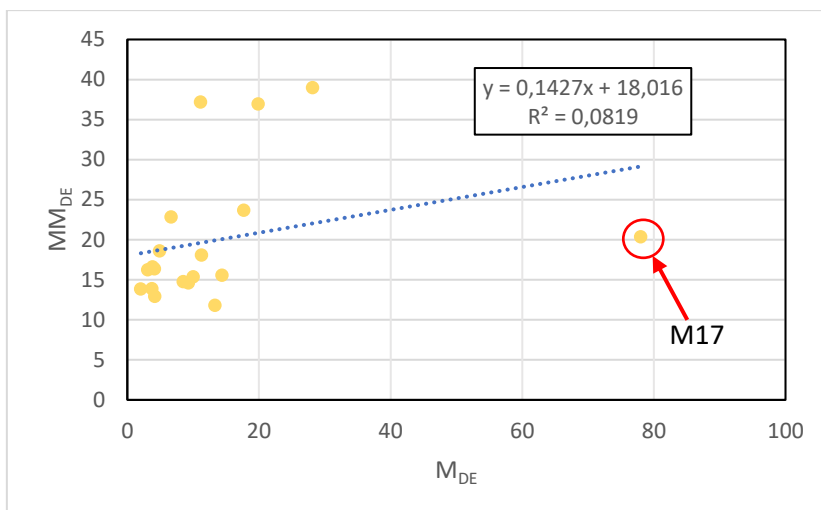
^[2] MM_{DE} er justert ved ekstra sikting etter tørking av materialet, grunnet høy grad nedmaling av materialet. Opprinnelig verdi var 13.



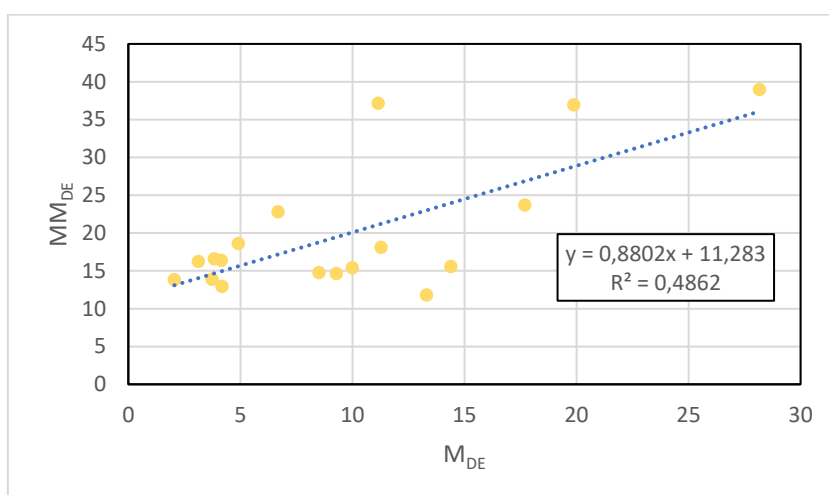
Figur 4.7 – Resultater, Annex D (MM_{DE})



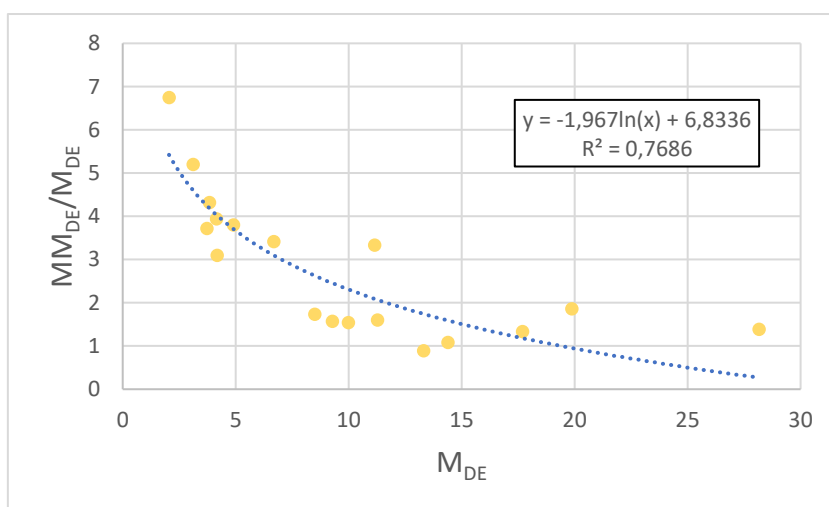
Figur 4.8 – Resultater, 10/14 mm og Annex D (M_{DE} og MM_{DE})



Figur 4.9 – Korrelasjon, 10/14 mm og Annex D (M_{DE} og MM_{DE}) inkludert materiale M17



Figur 4.10 – Korrelasjon, 10/14 mm og Annex D (M_{DE} og MM_{DE}) ekskludert materiale M17



Figur 4.11 – Korrelasjon, 10/14 mm og forholdet mellom Annex D og 10/14 mm (M_{DE} og MM_{DE}/M_{DE}) ekskludert materiale M17

4.4 Annex E (0.2/4 mm)

Tabell 4.6 og Figur 4.12 viser micro-Deval-verdiene etter testing på 0.2/4 mm i henhold til Annex E i prEN 1097-1 (CEN, 2021). Figur 4.13 viser resultatene for denne testfraksjonen sammenlignet med resultatene for referansefraksjonen 10/14 mm. De sorte markørene i Figur 4.12 og Figur 4.13 viser verdiene for de to parallellene for hvert material.

Ved å sette inn verdier fra Tabell 4.2 og Tabell 4.6 inn i korrelasjonsformelen gitt øverst i kapittel 4, blir korrelasjonen mellom M_{DE} og F_S 0,290. Dette tilsvarer en R^2 -verdi på 0,08, som også kan sees i Figur 4.14. Figuren viser at materiale M17 skiller seg ut fra resten. Det er derfor i tillegg utført en analyse uten dette materialet, som kan sees i Figur 4.15. Ved å ekskludere avviksmaterialet endres korrelasjonen til 0,855 og R^2 -verdien til 0,73. Med disse korrelasjonsverdiene som utgangspunkt, kan F_S beskrives ut fra M_{DE} etter følgende formel:

$$F_S = 1,7393 M_{DE} + 17,212$$

Figur 4.16 viser den logaritmiske sammenhengen mellom micro-Deval verdien fra standard testing og forholdstallet mellom verdiene fra Annex E og standard test. Ved å sette inn $\ln(M_{DE})$ for x og F_S/M_{DE} for y blir den logaritmiske korrelasjonen mellom M_{DE} og F_S/M_{DE} lik -0,858, som tilsvarer en R^2 -verdi på 0,74. Med disse korrelasjonsverdiene som utgangspunkt kan F_S/M_{DE} beskrives ut fra M_{DE} etter følgende formel:

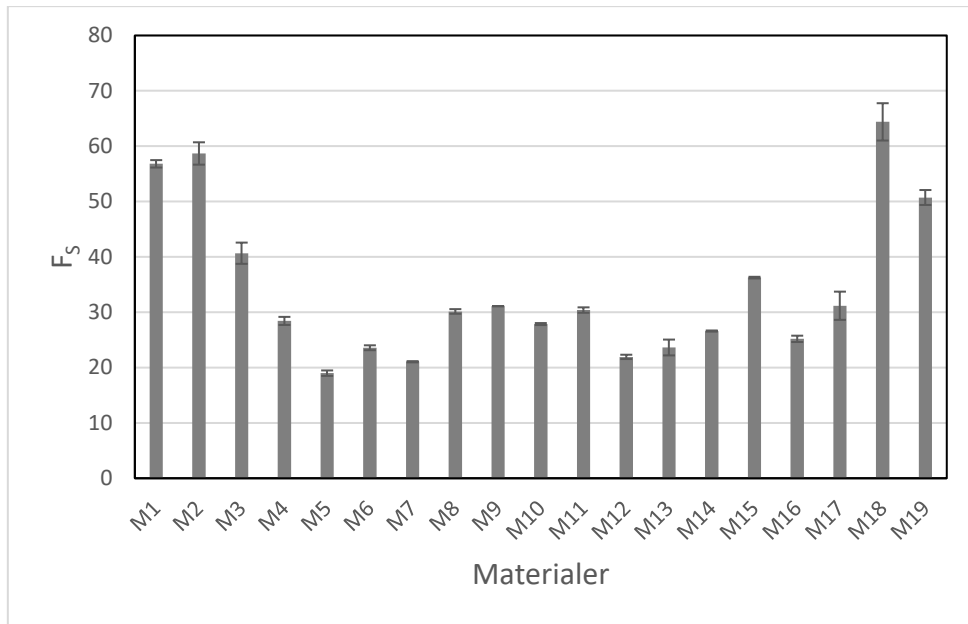
$$\frac{F_S}{M_{DE}} = -2,956 \ln(M_{DE}) + 10,702$$

Tabell 4.6 – Resultater, Annex E (F_S)

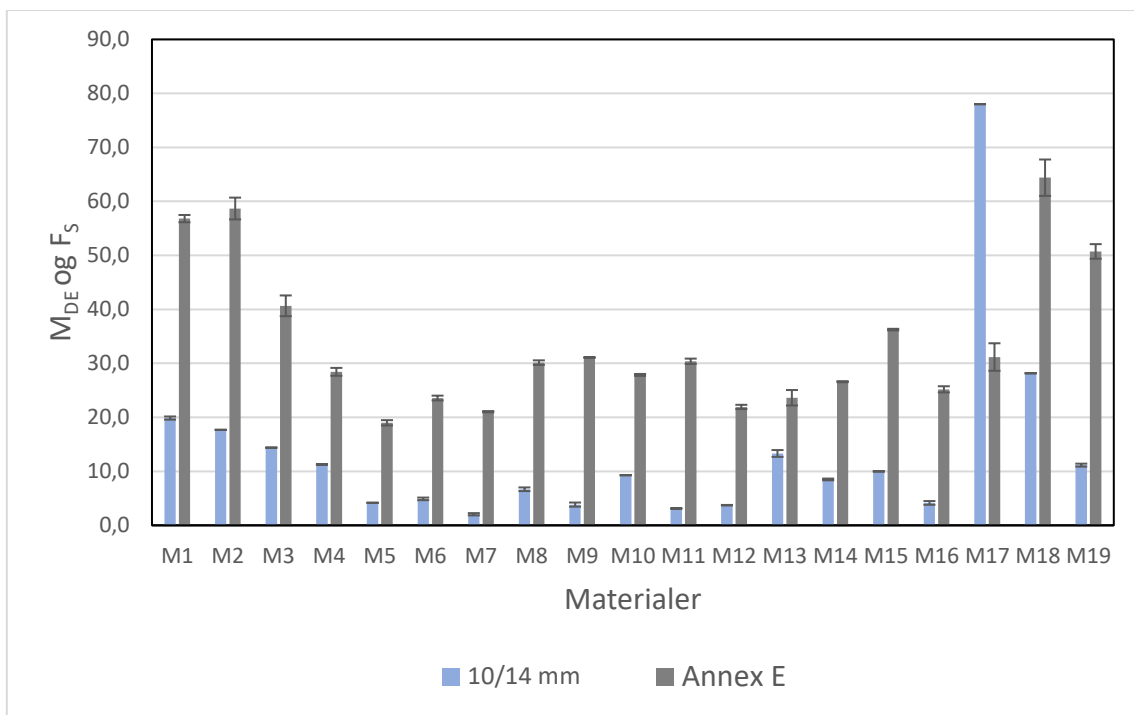
Material	F_S inkludert en desimal	F_S	F_S/M_{DE}
M1	56,8	57	1,9
M2	58,7	59	3,3
M3 ^[1]	40,7	41	2,8
M4	28,4	28	2,5
M5	19,0	19	4,5
M6	23,6	24	4,8
M7	21,1	21	10,3
M8 ^[1]	30,1	30	4,5
M9	31,1	31	8,1
M10	27,9	28	3,0
M11	30,4	30	9,7
M12	21,9	22	5,9
M13	23,6	24	1,8
M14	26,6	27	3,1
M15	36,3	36	3,6
M16	25,2	25	6,1
M17 ^[2]	31,2	31	-
M18	64,4	64	2,3
M19	50,7	51	4,5

^[1] Materialene var allerede siktet til en mer nøyaktig inndeling. Denne inndelingen har blitt benyttet til å sette sammen testeksemplarene. Nøyaktige verdier vises i vedlegg 6.

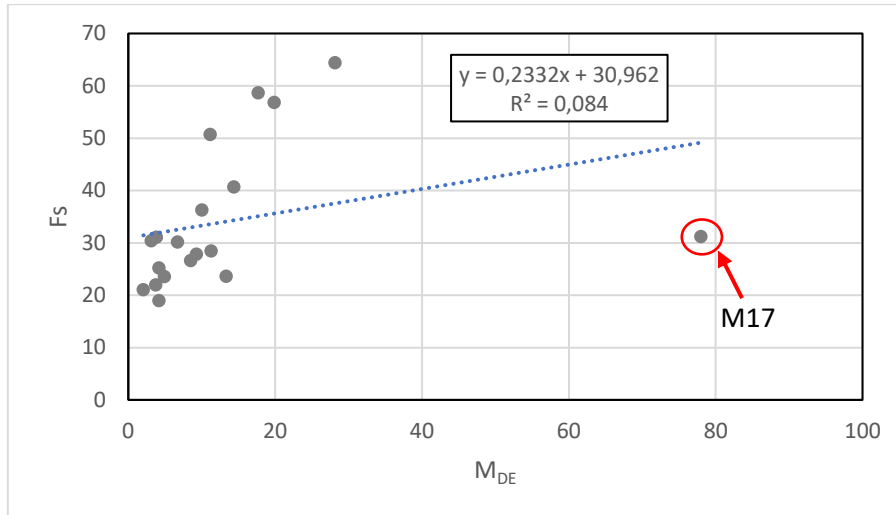
^[2] F_S er justert ved ekstra sikting etter tørking av materialet, grunnet høy grad nedmaling av materialet. Opprinnelig verdi var 21.



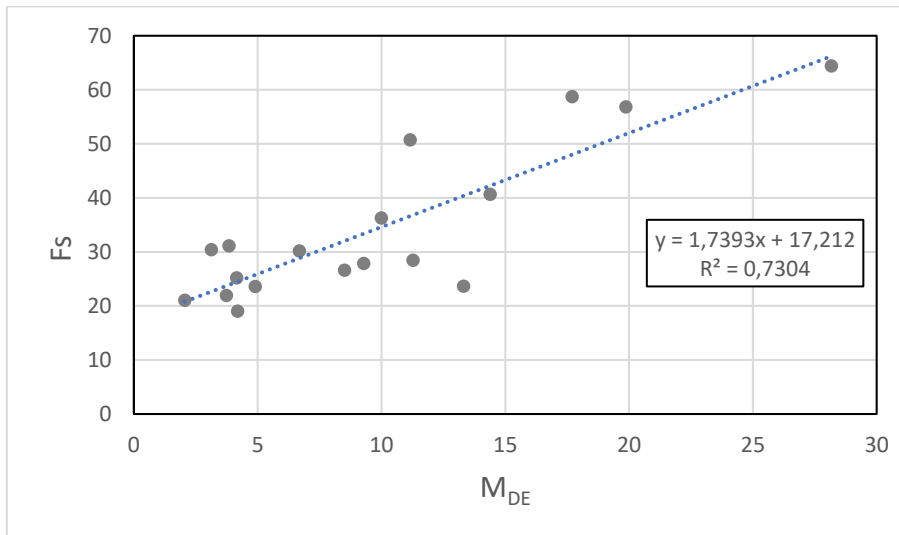
Figur 4.12 – Resultater, Annex E (F_s)



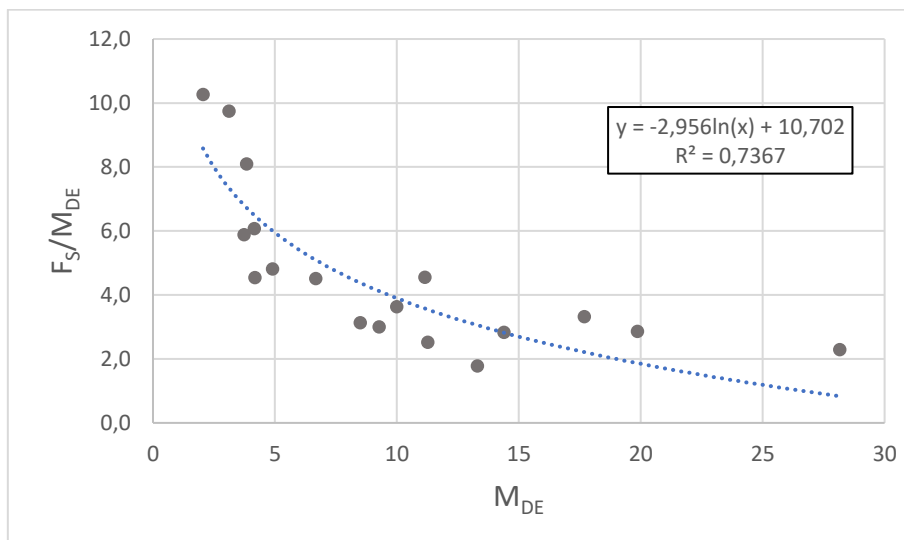
Figur 4.13 – Resultater, 10/14 mm og Annex E (M_{DE} og F_s)



Figur 4.14 – Korrelasjon, 10/14 mm og Annex E (M_{DE} og F_s) inkludert materiale M17



Figur 4.15 – Korrelasjon, 10/14 mm og Annex E (M_{DE} og F_s) ekskludert materiale M17

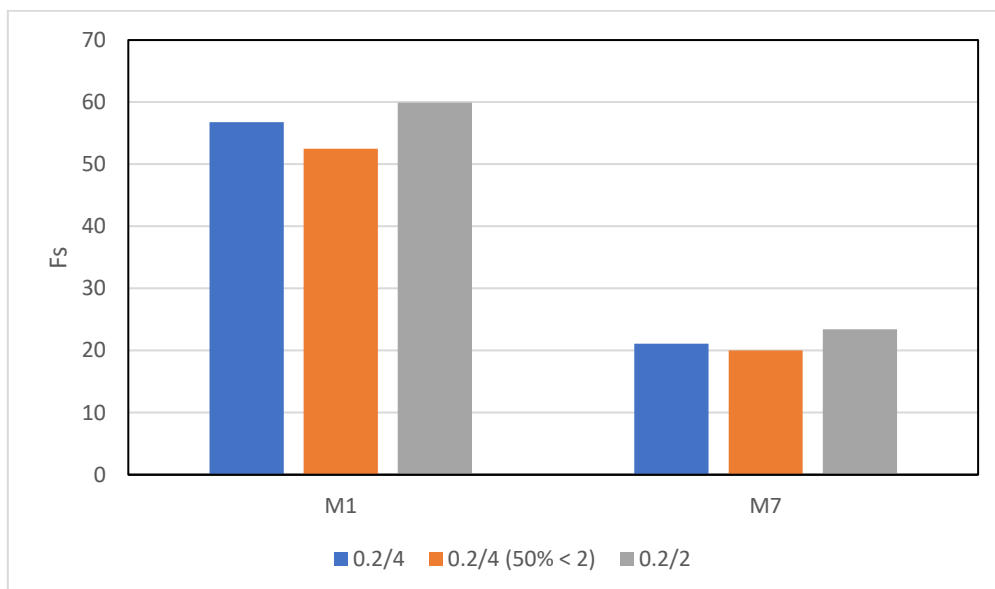


Figur 4.16 – Korrelasjon, 10/14 mm og forholdet mellom Annex E og 10/14 mm (M_{DE} og F_s/M_{DE}) ekskludert materiale M17

Resultatene for fraksjonene 0.2/2 mm, 0.2/4 mm med uspesifisert fordeling og 0.2/4 mm der 50 vektprosent passerer en mellomsikt på 2 mm (50/50-fordelingen) sammenlignes med hverandre. Dette gjelder kun for materialene M1 og M7. Tabell 4.7 og Figur 4.17 viser resultatene for de tre ulike kornsammensetningene for materialene. Fra tabellen og figuren kommer det frem at resultatene for de tre ulike fordelingene er relativt like. For begge materialene er massetapet høyest for 0.2/2-fordelingen og lavest for 50/50-fordelingen.

Tabell 4.7 – Resultater, ulike kornsammensetninger av Annex E (F_S)

Material	Fordeling	F_S med en desimal	F_S
M1	0.2/4	56,8	57
	0.2/4 (50% < 2)	52,5	52
	0.2/2	59,9	60
M7	0.2/4	21,1	21
	0.2/4 (50% < 2)	20,0	20
	0.2/2	23,4	23



Figur 4.17 – F_S for ulike kornfordelinger

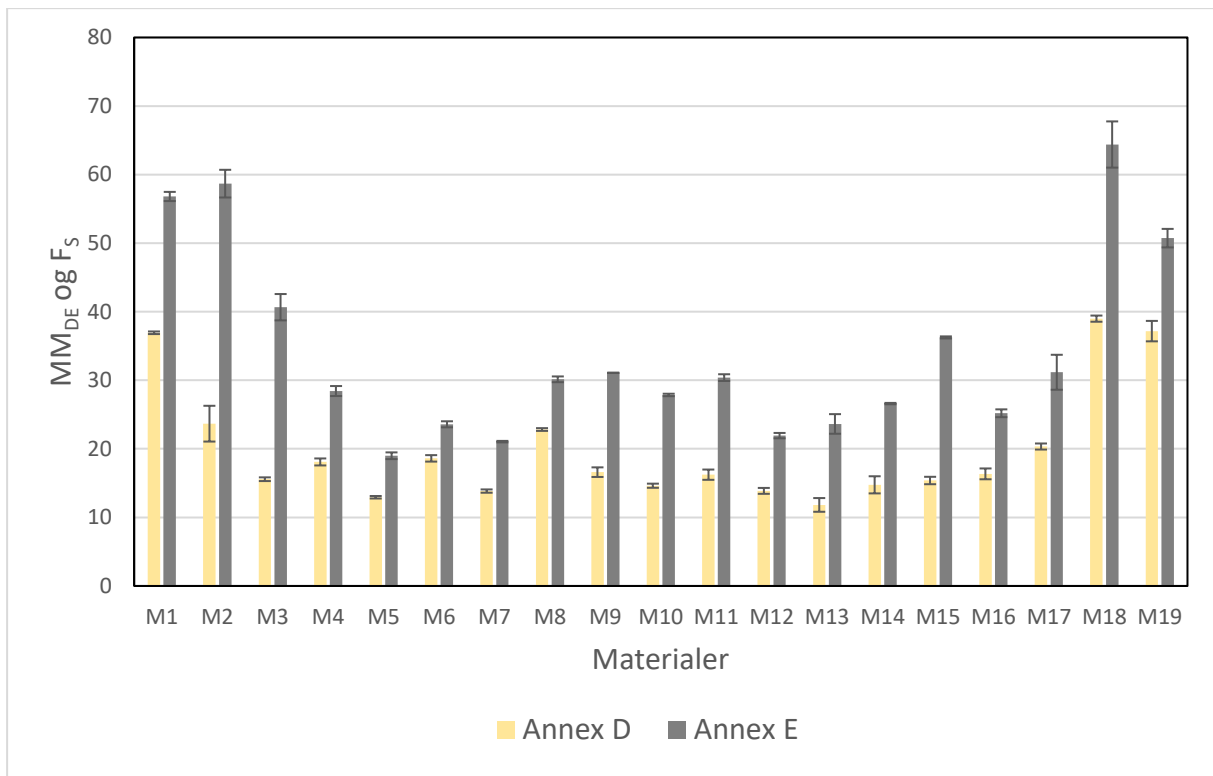
4.5 Sammenligning mellom Annex D og Annex E

For å se sammenhengen mellom de to nye metodene for fine fraksjoner sammenlignes verdiene fra Tabell 4.5 og Tabell 4.6 i Figur 4.18. Fra figuren kommer det frem at alle materialene har høyere verdier etter Annex E.

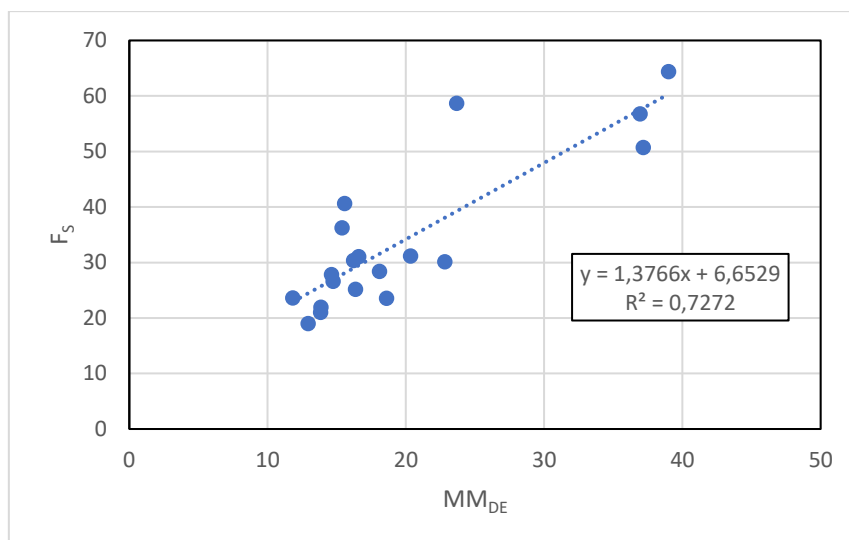
Ved å sette inn verdier fra Tabell 4.5 og Tabell 4.6 inn i korrelasjonsformelen gitt øverst i kapittel 4, blir korrelasjonen mellom MM_{DE} og F_S 0,855. Dette tilsvarer en R^2 -verdi på 0,73, som også kan sees i Figur 4.19. Basert på disse korrelasjonsverdiene, kan F_S beskrives ut fra M_{DE} etter følgende formel:

$$F_S = 1,3766 MM_{DE} + 6,6529$$

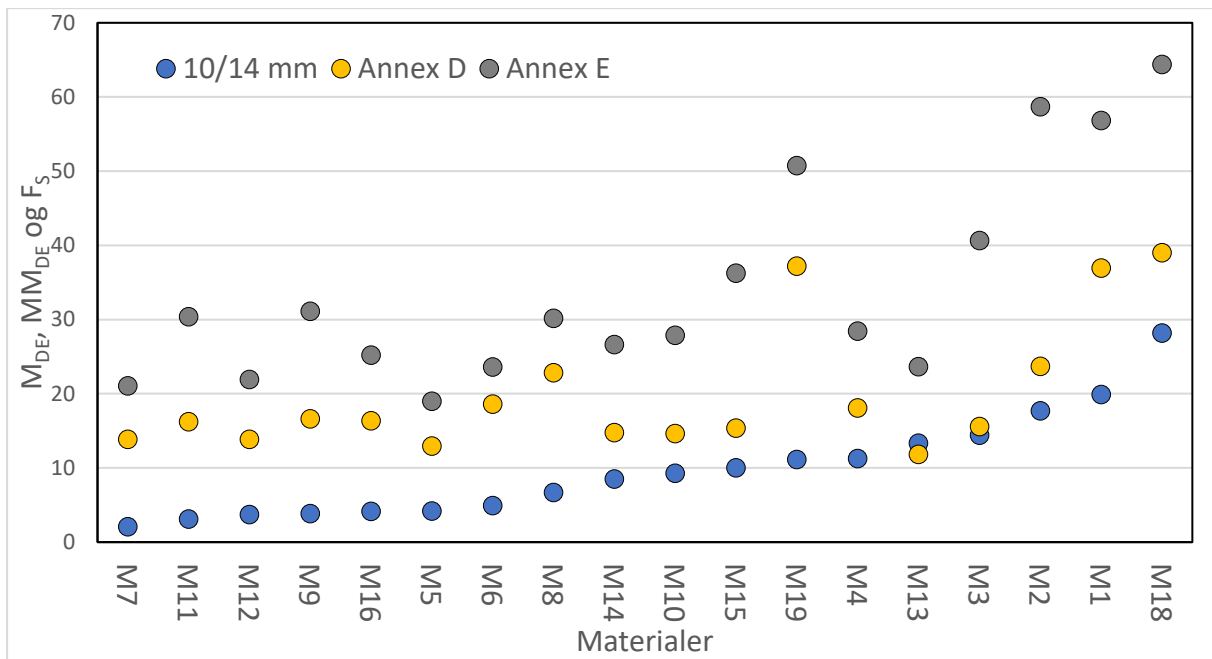
Figur 4.20 viser micro-Deval-verdier for referansefraksjonen sammen med resultater fra Annex D og Annex E i stigende rekkefølge fra venstre mot høyre etter M_{DE} . Figuren viser ikke verdier for materiale M17.



Figur 4.18 – Resultater, Annex D og Annex E (MM_{DE} og F_S)



Figur 4.19 – Korrelasjon, Annex D og Annex E (MM_{DE} og F_S)



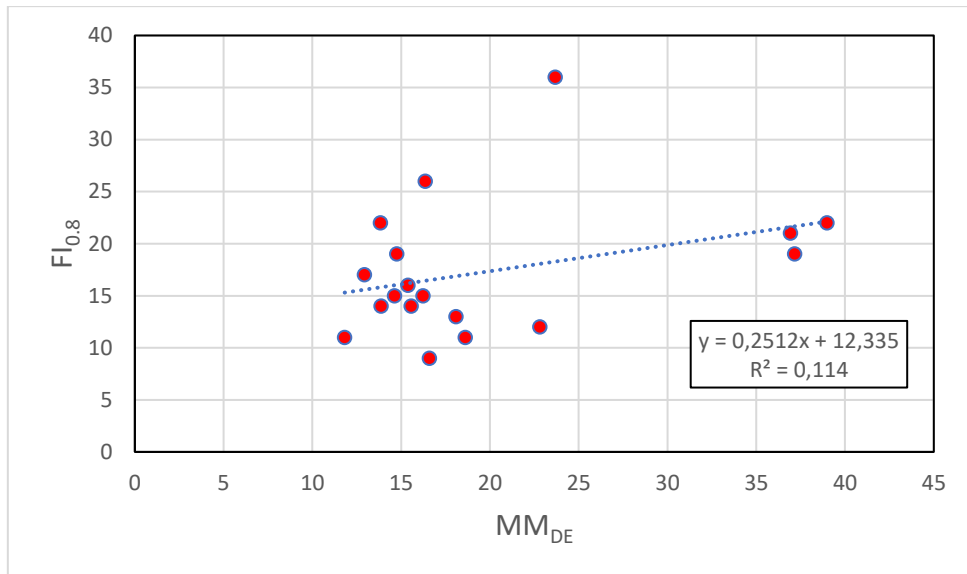
Figur 4.20 – Resultater, 10/14 mm, Annex D og Annex E (M_{DE} , MM_{DE} og F_S)

4.6 Flisighet

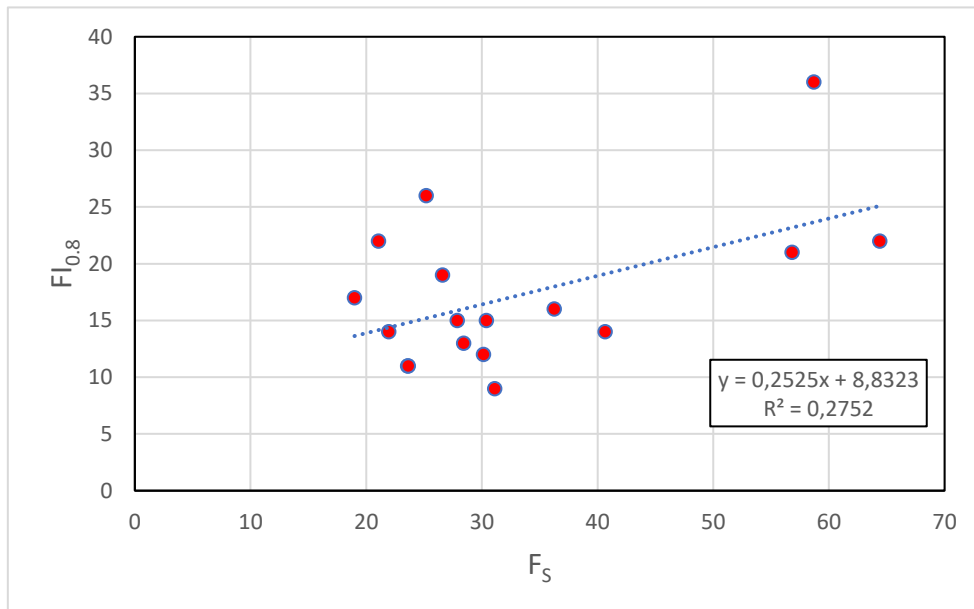
I dette delkapittelet sees resultatene fra Annex D og Annex E i sammenheng med flisighetsdata. Det er benyttet en ikke-standardisert metode for å måle flisigheten til materialer mellom 0.8 og 4 mm, som er beskrevet i Vinjes masteroppgave (Vinje, In prep.). Selv om metoden er utenfor standard, testes den etter samme prinsipp som standardisert metode for flisighet. Flisigheten for alle materialene er gitt i Tabell 4.8. Ved å sette inn verdier fra Tabell 4.5, Tabell 4.6 og Tabell 4.8 inn i korrelasjonsformelen gitt øverst i kapittel 4, blir korrelasjonen mellom MM_{DE} og $FI_{0.8}$ 0,334, mens den mellom F_S og $FI_{0.8}$ blir 0,525. Dette tilsvarer henholdsvis R^2 -verdier på 0,11 og 0,28, som også kan sees i Figur 4.21 og Figur 4.22.

Tabell 4.8 – Resultater, flisighet (Vinje, In prep.)

Material	$FI_{0.8}$	Material	$FI_{0.8}$
M1	21	M11	15
M2	36	M12	14
M3	14	M13	11
M4	13	M14	19
M5	17	M15	16
M6	11	M16	26
M7	22	M17	14
M8	12	M18	22
M9	9	M19	19
M10	15		



Figur 4.21 – Korrelasjon, Annex D og flisighet (MM_{DE} og $FI_{0,8}$)



Figur 4.22 – Korrelasjon, Annex E og flisighet (F_S og $FI_{0,8}$)

4.7 Mineralogi

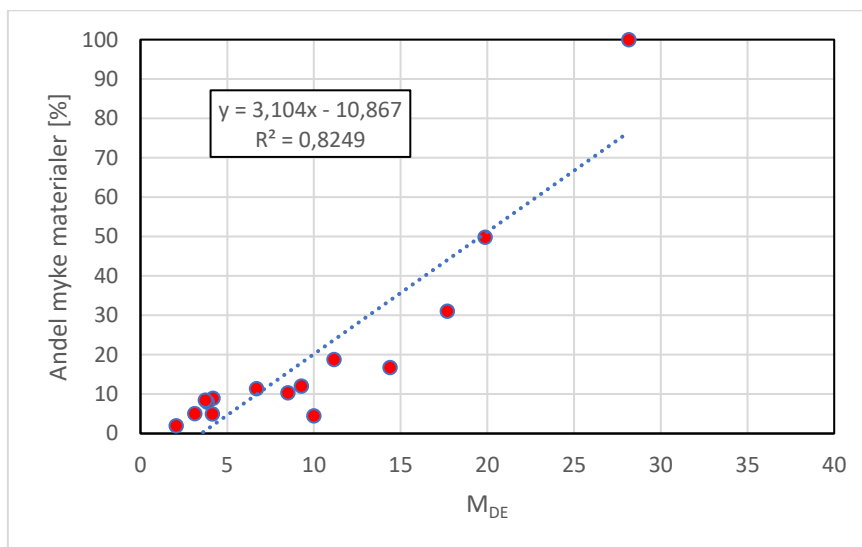
I dette delkapittelet sees resultatene fra standard micro-Deval, Annex D og Annex E i sammenheng med den totale andelen myke mineraler i materialene. Det er i hovedsak glimmer, kalk og kloritt som utgjør disse mineralene.

Tabell 4.9 viser andelen myke mineraler for de ulike materialene. For materialene M4, M6, M13 og M17 er data ikke tilgjengelig. Figur 4.23, Figur 4.24 og Figur 4.25 viser plott for de ulike gjennomføringsmetodene mot andelen myke mineraler. Alle figurene viser også en lineær trendlinje med tilhørende R^2 -verdi. Denne verdien er 0,82 for standard micro-Deval, 0,62 for Annex D og 0,65 for Annex E. Dette tilsvarer en korrelasjonsverdi på henholdsvis 0,908, 0,789 og 0,804. Glimmerinnholdet er også undersøkt for materialene med både glimmertellinger og XRD (Vinje, In prep.). Disse verdiene har i denne oppgaven

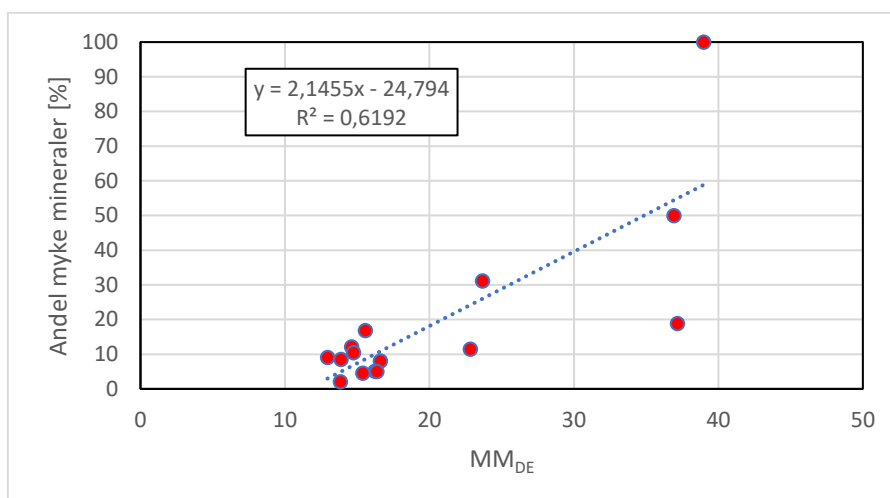
blitt sett i sammenheng med de tre micro-Deval-metodene. Korrelasjonen mellom glimerverdiene og M_{DE} , MM_{DE} og F_S , samt rådata for glimerverdiene er gitt i vedlegg 7.

Tabell 4.9 – Andel myke mineraler for de ulike materialene (Vinje, In prep.)

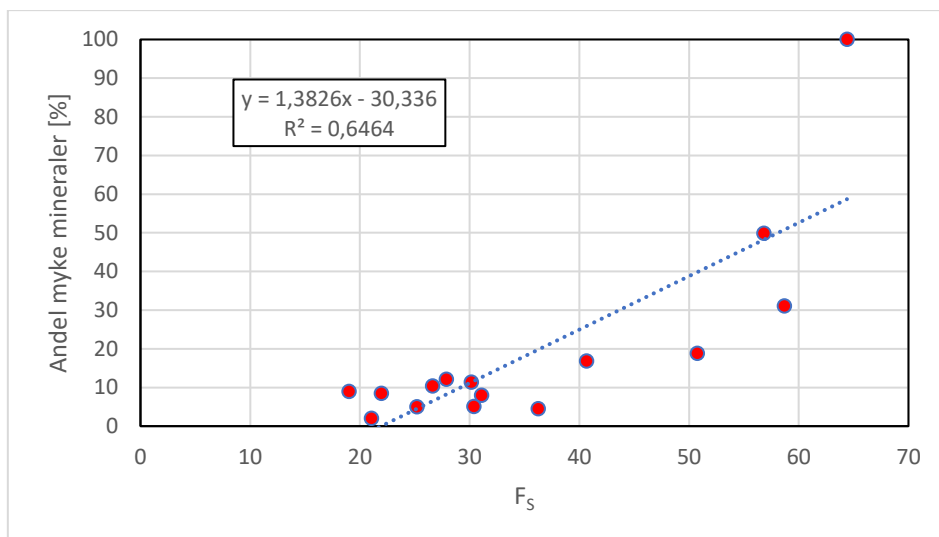
Material	Andel myke mineraler [%]	Material	Andel myke mineraler [%]
M1	49,9	M11	5,1
M2	31,1	M12	8,5
M3	16,8	M14	10,4
M5	9,0	M15	4,5
M7	2,0	M16	5,0
M8	11,4	M18	100,0
M9	8,0	M19	18,8
M10	12,1		



Figur 4.23 – Korrelasjon, 10/14 mm (M_{DE}) og andel myke mineraler



Figur 4.24 – Korrelasjon, Annex D (MM_{DE}) og andel myke mineraler



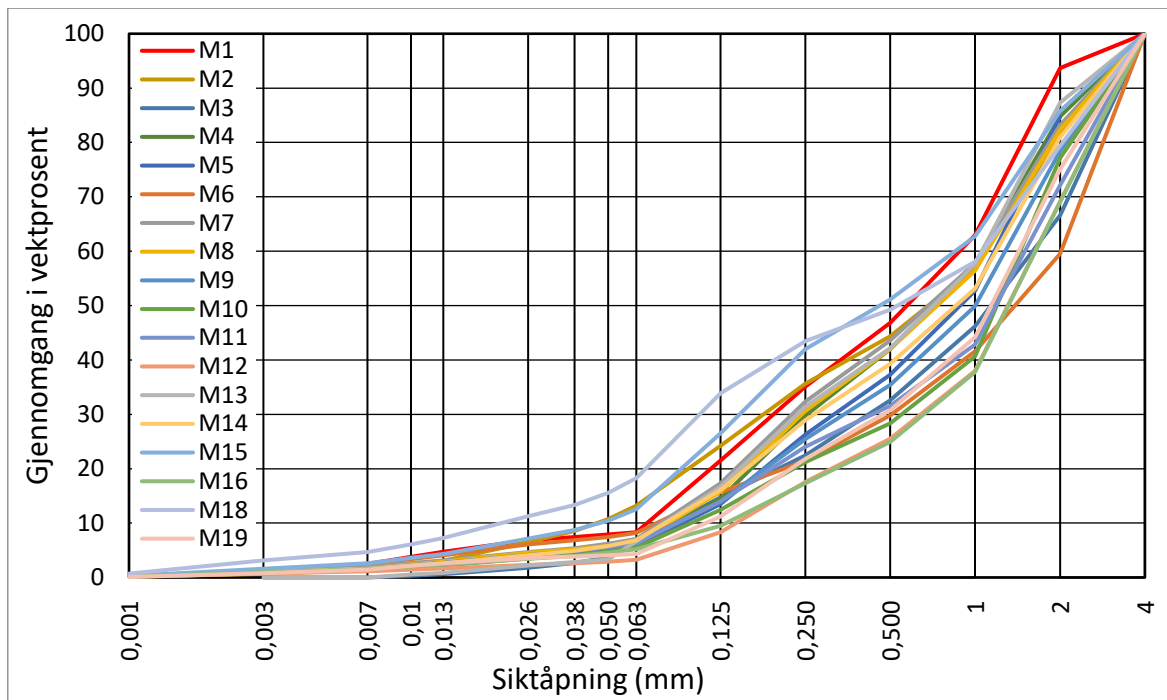
Figur 4.25 – Korrelasjon, Annex E (F_s) og andel myke mineraler

4.8 Korngradering

I dette delkapittelet sees siktekurvene for materialene opp mot micro-Deval-verdiene etter testing med Annex D og Annex E. Siktekurvene tar for seg kornstørrelse mindre enn 4 mm. Bestemmelse av tall til siktekurven for kornstørrelser < 0.063 mm er utført med laserdiffraksjon, med unntak for materialene M3 og M13 der det er brukt hydrometer (Vinje, In prep.). Figur 4.26 viser siktekurven for alle materialene, mens vedlegg 8 viser alle materialene hver for seg. For å se om graderingen til materialene har innvirkning på micro-Deval-verdiene benyttes graderingstallet, C_u . Graderingstallet regnes ut fra følgende formel:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

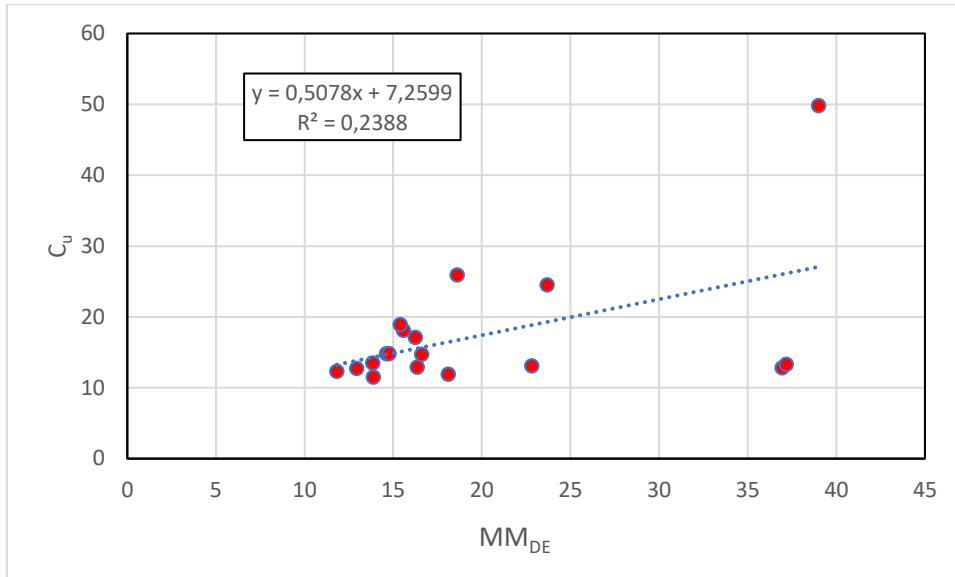
Der d_{60} og d_{10} er kornstørrelsen henholdsvis 60 og 10% av materialet er mindre enn. En oversikt over graderingstallene for de ulike materialene er gitt i Tabell 4.10. En verdi mindre enn 6 angir at materialet er ensgradert, mens en verdi over 15 angir at materialet er velgradert (NGF, 2011). Materiale M17 er ikke med i denne analysen ettersom siktekurve ikke er tilgjengelig. MM_{DE} og F_s plottet mot C_u vises i Figur 4.27 og Figur 4.28. R^2 -verdiene for lineær sammenheng for disse plottene er henholdsvis 0,24 og 0,35. Dette tilsvarer korrelasjonsverdiene 0,489 og 0,590.



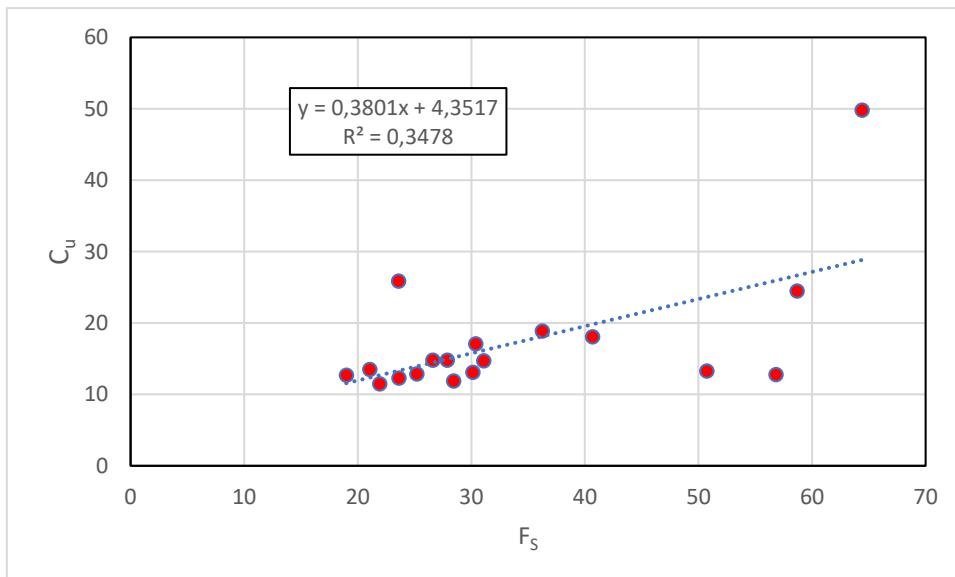
Figur 4.26 – Siktekurver for alle materialene

Tabell 4.10 – Graderingstall

Material	d_{10}	d_{60}	C_u
M1	0,07	0,91	12,8
M2	0,05	1,13	24,5
M3	0,09	1,68	16,0
M4	0,09	1,09	11,9
M5	0,10	1,23	12,7
M6	0,08	2,02	25,9
M7	0,08	1,09	13,5
M8	0,09	1,14	13,1
M9	0,09	1,35	14,7
M10	0,10	1,53	14,8
M11	0,09	1,59	17,1
M12	0,15	1,71	11,5
M13	0,09	1,08	10,8
M14	0,08	1,25	14,8
M15	0,05	0,88	18,9
M16	0,13	1,71	12,9
M18	0,02	1,09	49,8
M19	0,11	1,51	13,3



Figur 4.27 – Korrelasjon, Annex D og graderingstall (MM_{DE} og C_u)



Figur 4.28 – Korrelasjon, Annex E og graderingstall (F_s og C_u)

5 Diskusjon

Dette kapitlet har til hensikt å diskutere metodene for datainnsamling beskrevet i delkapittel 3.3 og resultatene som er presentert i kapittel 4. Til å begynne med diskuteres resultatene som kommer frem i oppgaven. Denne diskusjonen er delt i to. Først sees det på de grovere fraksjonene, der fokuset ligger på resultatene fra utførte tester i micro-Deval etter Annex C (8/11.2 og 11.2/16 mm) i EN 1097-1 (CEN, 2011), etterfulgt av resultatene for de finere fraksjonene oppnådd etter gjennomføring av Annex D (0.25/5.6 mm) og Annex E (0.2/4 mm) i henhold til prEN 1097-1 (CEN, 2021). Fra resultatene var det to materialer som skilte seg ut, disse vil bli diskutert næyere. Resultatene for flisighet, mineralogi og korngradering vil så bli diskutert. Til slutt vil det diskuteres hvilke feilkilder som kan ha påvirket resultatene og det foreslås videre arbeid innenfor forskningsfeltet.

5.1 Grove fraksjoner

Resultatene i delkapittel 4.2 viser en sterk lineær sammenheng mellom testing på referansefraksjonen og testing etter variasjonene beskrevet i Annex C. Dette vises spesielt i Figur 4.3 og Figur 4.5. Disse resultatene er som forventet ettersom det er nærliggende testfraksjoner, og nesten like stor total vekt på stålkulene. Referansefraksjonen 10/14 mm, består av delfraksjonene 10/11.2 og 11.2/14 mm. Dette betyr at det er en overlapp mellom fraksjonene i standard gjennomføring og etter Annex C. Resultatene kan sees i sammenheng med litteraturen beskrevet i delkapittel 2.3. Med økende vekt av stålkuler vil vekttapet øke (Tanyu, Yavuz og Ullah, 2017), mens med økende fraksjonsstørrelse vil vekttapet minke (Rangaraju og Edlinski, 2008). $M_{DE8/11}$ har litt mindre steinstørrelse, men også mindre total vekt av stålkuler. For $M_{DE11/16}$ er det motsatt. Resultatene viser at denne tilpasningen er tilstrekkelig for å holde micro-Deval-verdien på samme nivå som for referansefraksjonen. Den lineære regresjonen viser en korrelasjon som er større enn 0,99 for både 8/11.2 og 11.2/16 mm. I tillegg viser stigningstallet og krysningpunktet av y-aksen at det er tilnærmet en 1:1 sammenheng med krysning i nærheten av origo.

Ved å bruke regresjonslinjen er det mulig å se at $M_{DE8/11}$ og $M_{DE11/16}$ tilsvarer tilnærmet M_{DE} . Tabell 5.1 viser utregnede verdier for $M_{DE8/11}$ og $M_{DE11/16}$ etter regresjonslinjene gitt i delkapittel 4.2 for M_{DE} lik 7, 15 og 25. Ut fra tabellen kommer det frem at det er veldig små forskjeller mellom verdiene. Ved å bruke maksverdien for bærelag som eksempel ($M_{DE} = 15$) vil kun et materiale som havner under grenseverdien ved testing på referansefraksjonen, overstige kravet ved testing med 8/11.2 mm. Verdiene er dog i grenseland for begge utførelsene. Ved å tillate en likestilling mellom testfraksjonene må det forventes slike situasjoner for materialer i grenseområdet. Det er også mulig at en slik observasjon forekommer i en sammenligning av ulike gjennomføringer med samme fraksjon. For 11.2/16 mm er derimot alle de samme materialene innenfor kravet som for referansefraksjonen. En likestilling av testfraksjoner finnes både i Norge og Sverige for kulemølltesten, da det er mulig å teste for 8/11.2 og 11.2/16 mm (Statens vegvesen, 2021; Trafikverket, 2011b). Sammenhengen Erichsen fant for kulemølle mellom disse testfraksjonene ligner på resultatene funnet i denne oppgaven for micro-Deval (Erichsen, 2006). I tillegg er det påvist en sammenheng mellom micro-Deval og kulemølle (Erichsen, 2013; Erichsen, Ulvik og Sævik, 2011). I Sverige er også mulig å teste på 8/11.2 for micro-Deval og Los Angeles.

Tabell 5.1 – Eksempelverdier regnet ut etter regresjonslinjene

M_{DE}	7	15	25
$M_{DE8/11} = 0,9978 M_{DE} + 0,5861$	7,57	15,55	25,53
$M_{DE11/16} = 1,0372 M_{DE} - 0,6101$	6,65	14,95	25,32

5.2 Fine fraksjoner

Sammenhengen som ble sett med standard gjennomføring og Annex C ble ikke gjensvart med Annex D og Annex E. Ut fra figurene som sammenligner referansefraksjonen med metodene for finere fraksjoner (Figur 4.9 og Figur 4.14) kommer det ikke frem noen sammenheng mellom disse to metodene og standard micro-Deval. Det er også ganske synlig at ett materiale har stort avvik fra den generelle trenden. Dette er materiale M17, og grunnen til dette avviket diskuteres i delkapittel 5.3. Ved å utelate materialet fra analysen oppnås en mye bedre korrelasjon mellom de nye metodene og standard micro-Deval, men selv med å utelate materiale M17 oppnås en R^2 -verdi på kun i underkant av 0,5 mellom M_{DE} og MM_{DE} . Denne verdien er mye mindre enn den som forekommer mellom de grove fraksjonene, men det vises allikevel en sammenheng mellom M_{DE} og MM_{DE} . Fra denne analysen ser det ut til at også material M19 avviker litt, men dog ikke i samme grad som M17. I delkapittel 5.3 diskuteres også dette avviksmaterialet videre.

For regresjonen mellom referansefraksjonen og Annex E oppnås en vesentlig høyere R^2 -verdi (0,73). Materiale M19 ser her ut til å passe mer inn med de andre materialene. Dersom M19 hadde blitt utelatt fra analysen ville R^2 -verdien endres til 0,6 og 0,77 mellom M_{DE} og henholdsvis MM_{DE} og F_S . Å utelate dette materialet vil gjøre at korrelasjonene for de to metodene blir mer lik, men korrelasjonen er fortsatt størst ved å teste etter Annex E. Det er ingen åpenbare grunner for hvorfor dette materialet skal utelates fra analysen, og beholdes derfor. Om M17 inkluderes i analysen mellom referansefraksjonen og Annex E vil det, som for Annex D, ikke bli noen sammenheng.

Dersom forholdstallet MM_{DE}/M_{DE} sammenlignes med M_{DE} , oppnås en logaritmisk korrelasjonsverdi på -0,877 og tilhørende R^2 -verdi på 0,77. Dette er betraktelig bedre enn sammenhengen mellom MM_{DE} og M_{DE} . For forholdstallet F_S/M_{DE} sammenlignet med M_{DE} blir den logaritmiske korrelasjonen -0,858 med tilhørende R^2 -verdi på 0,74. Dette er omtrent samme sammenheng som mellom F_S og M_{DE} . Figur 4.11 og Figur 4.16 viser at lavere micro-Deval-verdi fra standard gjennomføring gir høyere forholdstall i begge tilfellene. Det største forholdstallet (MM_{DE}/M_{DE}) oppnås av det beste materialet ut fra standard micro-Deval, M7, som en økning på 6,8 ganger M_{DE} . Dette gir mening med tanke på at et materiale som M7, med en $M_{DE} = 2$, trenger bare en MM_{DE} på 4 for å oppnå en dobling i verdi, mens M18 trenger en økning på ca. 30 for å oppnå samme forhold.

Det at materiale M17 fikk en mye lavere verdi enn forventet ut fra standard micro-Deval ($M_{DE} = 78$) og fra observasjoner av materialet både før og etter testing, kan være et problem for metoden ettersom lignende materialer kan bli klassifisert som gode. Å bruke slike materialer i vegbygging ville være katastrofalt for bæreevnen. På andre siden ville fagpersoner kunne eliminere slike materialer kun ved å se på dem. I tillegg vil andre tester kunne plukke opp mangelen på egnethet til vegformål.

Ut fra resultatene i delkapittel 4.3 og 4.4 er det tydelig forskjell i verdiene oppnådd ved testing etter Annex D og Annex E i forhold til standard metode. Dette kan forklares med

at det er flere endringer i metoden, i motsetning til de små forskjellene i metodene for de grove fraksjonene. Som litteraturen presentert i delkapittel 2.3 antyder har kulevekten, kornstørrelse og kjøretid mye å si for vekttapet. I tillegg til at det er endring i minste siktåpning som benyttes. Derfor er det vanskelig å bestemme hvor stor innvirkning hver enkelt faktor har på micro-Deval-verdien. Litteraturen sier også at det ikke er sikkert at et materiale har samme egenskaper i fine som for grove fraksjoner (Strzałkowski og Kaźmierczak, 2021). De to ulike undersøkelsene fra Hossain et al. tyder også på at resultatene fra testing på grove korn stemmer bedre overens med erfaringsbasert klassifisering (Hossain, Lane og Schmidt, 2008a; 2008b)

Det kan også stilles spørsmål ved bruken av de nye stålkulene, ettersom en endring fra 10 til 30 mm tilsvarer en 27-dobling i vekt for en kule. Ved å øke diameteren samtidig som kornstørrelsen senkes vil dette ligne mer på forholdet som er mellom steinmaterialet og kulene som benyttes i Los Angeles-metoden. Som beskrevet i avsnitt 2.2.2 tester Los Angeles og micro-Deval for ulike egenskaper. Det er også kjent at disse to testmetodene ikke har god korrelasjon (Hossain, Lane og Schmidt, 2008b; Lui, Zhao og Mullin, 2017). En slik endring i størrelsesforhold mellom kuler og material er også å finne i EN 1097-2 (CEN, 2020). Referansefraksjonen til Los Angeles er 10/14 mm, mens 31.5/50 mm brukes til testing for jernbaneballast. Selv om fraksjonen endres såpass mye, brukes de samme kulene. Eneste forskjell er at det legges til en ekstra kule. Et spørsmål som kan stilles er da om slike endringer vil medføre at andre egenskaper testes i forhold til standard gjennomføring. Hvis formålet er å sjekke om ulike fraksjoner av samme material har ulike egenskaper vil dette være problematisk. ASTM-standardene unngår dette eventuelle problemet ved å benytte de samme kulene ved testing på fine og grove fraksjoner i micro-Deval (9,5 mm) (ASTM, 2015; 2017). Også et pågående prosjekt i Sverige bruker standard micro-Deval-kuler (10 mm), når det sees på muligheten til å teste på fraksjonen 2.8/4 mm for borekaks (Artursson, Englund og Stenlid, 2022).

Det er moderat til god korrelasjon mellom resultatene etter utførelse i Annex D og Annex E. Figur 4.19 viser at en lineær trendlinje mellom MM_{DE} og F_S oppnår en R^2 -verdi på 0,73. Det er også små forskjeller mellom disse metodene, som gjør at det kan forventes en god sammenheng. Figur 4.18 viser at vekttapene oppnådd i Annex E er større enn for Annex D for samtlige materialer. Annex D benytter litt større øvre kornstørrelse, som resultatene til Rangaraju og Edlinski viser, minker vekttapet (Rangaraju og Edlinski, 2008). I tillegg vil en større minste siktåpning hos Annex E øke vekttapet ved at større korn har muligheten til å passere sikten. Det er derimot ikke lett å påvise hvilke av disse to faktorene som har størst påvirkning ut fra resultatene i denne oppgaven.

Figur 4.20 viser resultatene etter standard gjennomføring, Annex D og Annex E sortert etter M_{DE} (økende mot høyre). Fra figuren ser det ut til å være en trend med et sprang i verdi mellom standard micro-Deval og Annex D, etterfulgt av et mindre hopp til Annex E. Dette gjelder for seks av de åtte materialene lengst til venstre. Det er bare M9 og M11 som ikke følger denne trenden, men her er det lite om å gjøre. For de resterende ti materialene i figuren følger ni av dem motsatt trend. Altså større sprang mellom Annex D og Annex E enn mellom standard micro-Deval og Annex D. Denne oppgaven ser ingen åpenbar forklaring på dette. En mulig forklaring kan finnes ved å se nærmere på geologien til materialene.

Beskrivelsene for Annex D og Annex E i prEN 1097-1 gir uttrykk for at ulike egenskaper testes (CEN, 2021). For Annex D beskrives dette som en modifisert micro-Deval-verdi, mens det for Annex E beskrives som en sprøhetsverdi. Navnene tilsier at resultatene fra

Annex D vil ha en god sammenheng med M_{DE} , mens Annex E tester for noe annet. Dette virker litt merkelig ettersom metodene for Annex D og Annex E er nesten identiske. Forskjellene er kun minste siktåpning, kornfordelingen og en liten endring i testfraksjon. Det kan stilles spørsmål om slike små endringer i testmetode, endrer egenskapen som testes. Selv om Figur 4.18 viser at Annex E oppnår høyere verdier for alle materialer, viser Figur 4.19 en moderat til god korrelasjon mellom metodene.

Generelt vil det være vanskelig å velge nye kravverdier for disse testene, ettersom analyseverdiene fra Annex D og Annex E er høyere enn kategoriseringsklassene for M_{DE} i EN 13242 og EN 13043 (CEN, 2009; 2008). Det behøves et større datagrunnlag før forslag til krav kan stilles, i tillegg til at kravtabeller for Annex D og Annex E må være tilgjengelig. Dessuten vil det være viktig å finne ut hvilke av parameterendringene fra standard micro-Deval som gir størst utslag på verdi.

En av de største endringene er tidsaspektet ved testene. Ved å redusere kjøretiden ned til 15 minutter blir testingen mye mer effektiv. En annen ting som gjorde prosessen raskere, var størrelsesforskjellen på steinkornene og stålkulene. I standard gjennomføring er kulene og kornene i samme størrelsesorden, mens kulene er mye større enn kornene i Annex D og Annex E. Dette gjør at de enklere kan isoleres når materialene vaskes etter testing, og dermed blir mye lettere å fjerne fra materialet. Ved vasking av finstoffet var det derimot vanskeligere å se om alle kornene som skulle passere minste siktåpning hadde gjort det. Dette gjorde at en del av vaskingen kanskje ble gjennomført unødvendig lenge for å være sikker på at materialet som skulle, hadde passert sikten.

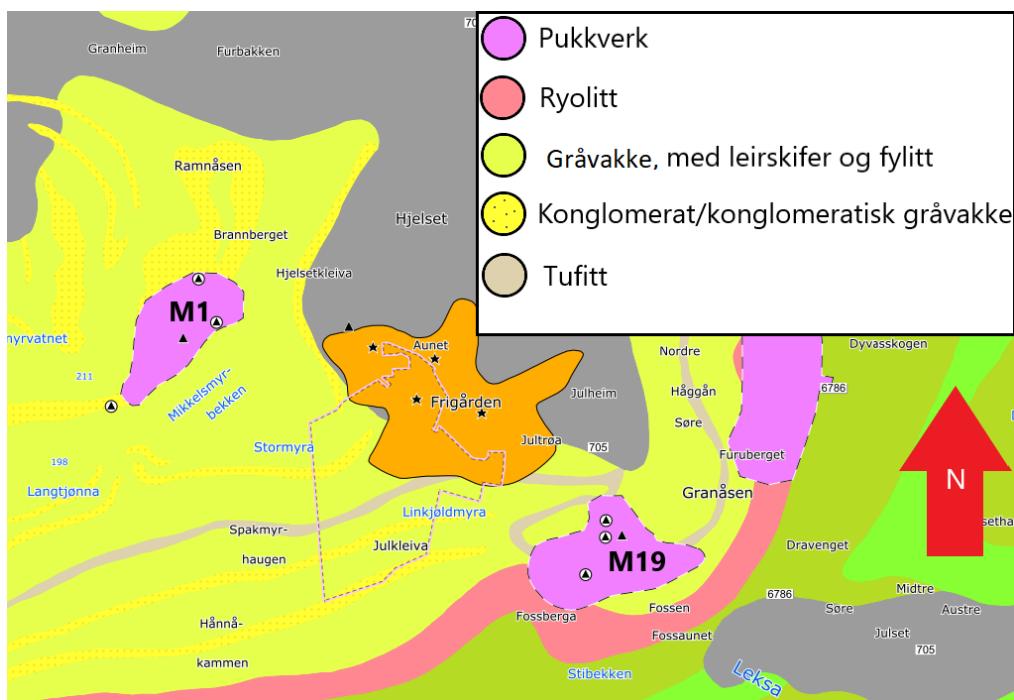
5.3 Vurderinger av avvikende materialer

Som diskutert i delkapittel 5.2 skilte materiale M17 seg ut fra de andre. Det var noe overraskende at dette materialet gikk fra en M_{DE} på 78 til MM_{DE} og F_s på henholdsvis 20 og 31. Det er mulig å stille spørsmål om M_{DE} er til å stole på, men den eksterne aktøren testet M17 en ekstra gang for å verifisere resultatet. I tillegg oppnådde materialet en høy Los Angeles-verdi og ble utsatt for en nesten total nedmaling etter Annex D og Annex E. Material M18 fikk en sammenlignbar nedmaling ved bruk av disse metodene, men fikk en økning i vekttap sammenlignet med testing med 10/14 mm. Figur 5.1 viser et bilde av disse to materialene etter testing, vasking og tørking etter Annex D. Denne typen nedmaling er noe av det samme som ble observert etter standard gjennomføring for M17, og er forventet ettersom materialet består av store mengder glimmer (Adomako *et al.*, 2021). De relativt lave vekttapene i de nye metodene for de fine fraksjonene kan muligens forklares med at de nedknuste flakene virker å være relativt flate og dermed ikke passerer sikten. En annen mulig forklaring er at glimmeret kan gi en dempende effekt, siden mineralkornene er myke og til dels bøyelige. De vil da kunne adaptere seg til omgivelsene istedenfor å knekke. Ettersom det var såpass stor nedmaling, ble testeksemplarene vasket i flere omganger for at sikten ikke skulle bli blokkert. Vaskingen ble også utført over en lengre periode enn for de andre materialene. De opprinnelige verdiene, 13 og 22, ble korrigert med at materialet etter tørking ble siktet en ekstra gang med siktemaskin. Selv om verdiene fikk en økning, utgjorde ikke justeringen nok til å utligne forskjellen fra standard micro-Deval.

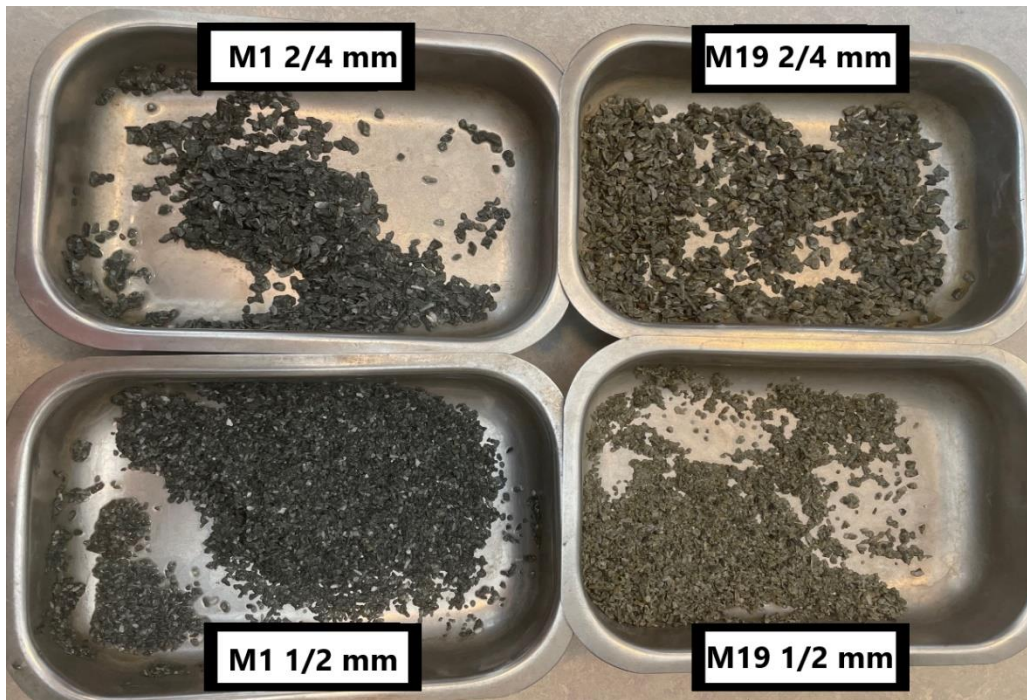


Figur 5.1 – M17 (t.v.) og M18 (t.h.) etter Annex D

I Figur 4.20, som sammenligner M_{DE} , MM_{DE} og F_S , vises et stort sprang i verdier mellom M_{DE} og MM_{DE} for material M19. Spranget mellom MM_{DE} og F_S er mer likt de andre materialene. Som vist i Figur 5.2 ligger pukkverket M19 hentes ut av, over de tre ulike bergartene ryolitt, tufitt og gråvakke blandet med fyllitt og leirskifer (NGU, 2022b). Hvis de grove og fine fraksjonene består av ulike bergarter, ville dette kunne forklare forskjellen i tap av vekt. Dette anses derimot som lite sannsynlig på grunn av flere faktorer. Pukkverket drives i dag i den sørvestlige delen av området, hvor kartlagt bergart er ryolitt. Til sammenligning ligger pukkverket til M1 i nærheten. Figur 5.2 viser at berggrunnen ved M1 preges av gråvakke som for M19, samt av konglomerat/konglomeratisk gråvakke. Grunnet grov målestokk er grensene på kartet ikke helt nøyaktige. Figur 5.3 viser en sammenligning av materialene i fraksjonene 1/2 og 2/4 mm med en tydelig forskjell innbyrdes. Det er også utført mikroskopanalyse som slår fast at M19 i hovedsak består av ryolitt, mens M1 består av gråvakke (Vinje, In prep.). Ettersom M19 består av ryolitt ned til 1 mm er det tvilsomt at resten av fraksjonen er sammensatt med en annen bergart.



Figur 5.2 – Kart over berggrunnen rundt M1 og M19



Figur 5.3 – Visuell sammenligning av M1 og M19 for Annex D og Annex E

Ved å benytte større stålkuler, vil forholdet mellom størrelse av materiale og stålkuler minne mer om Los Angeles-testen. Ettersom Los Angeles korrelerer mye med sprøhetstallet (Erichsen, 2001), kan da en mulig forklaring være at M19 er et sprøtt materiale. Ut fra pukkdatabasen til NGU, har materialet en Los Angeles-verdi rundt 16 (NGU, 2022a). Fra dette virker det som sprøhet ikke er forklaringen på variasjonen til M19. Det er derfor usikkert hva som er årsaken til avviket.

5.4 Flisighet og mineralogi

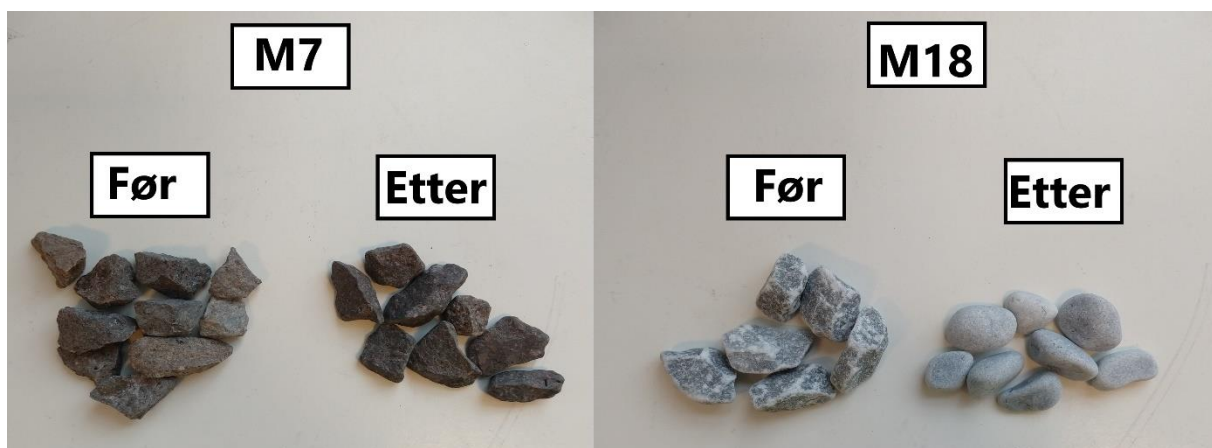
Figur 4.21 og Figur 4.22 viser den ikke-standardiserte flisighetsindeksen ($FI_{0.8}$) plottet mot micro-Deval-verdiene fra Annex D og Annex E. Alle figurene viser tilsynelatende liten korrelasjon mellom indeksen og vekttapene fra micro-Deval. Fra teoridelen ble det nevnt at flisigheten hadde en innvirkning på micro-Deval-verdiene (Benediktsson, 2015). Trendlinjene i Figur 4.21 og Figur 4.22 viser en liten positiv stigning for alle tre metodene, men ettersom korrelasjonen er såpass lav vil det ikke kunne sies at det er en sammenheng. Resultatene oppnådd i denne oppgaven ser ut til å passe bedre inn med funnene til Czinder og Török, som ikke så en sammenheng mellom flisighet og micro-Deval (Czinder og Török, 2021). Benediktsson og Czinder og Török brukte standard metode for flisighet i sine undersøkelser, mens det her er benyttet en ikke-standardisert metode. Derfor er det ikke sikkert at resultatene er sammenlignbare.

Figur 4.23 til Figur 4.25 viser en god sammenheng mellom den totale myke mineralandelen og vekttapene for de ulike micro-Deval-metodene. Fra vedlegg 7 er ikke denne sammenhengen like god for glimmerinnhold. Et bra eksempel på dette, er materiale M18, som ikke inneholder glimmer. Materialet består derimot utelukkende av kalkstein, som ifølge Ulvik og Erichsen gir stort vekttap (Ulvik og Erichsen, 2006). Materiale M8 inneholder heller ikke glimmer, og derfor vil vekttapene plottet mot andel glimmer få noen punkter som ligger på den ene aksene som igjen vil ødelegge korrelasjonen. Flere resultater støtter at stor andel harde mineraler gir lavere vekttap i micro-Deval, mens stor andel myke gir høyt vekttap (Capik og Yilmaz, 2017; Hossain, Lane og Schmidt, 2008b; Nålsund, 2014;

Adomako *et al.*, 2021; Takarli, Phelipot-Mardele og Prince, 2009; Wang *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2018). Litteraturen nevner også grenser på hvor mye henholdsvis glimmer og kvarts som må til for at det skal gi utslag på verdien (Adomako *et al.*, 2021; Nålsund, 2014). Adomako *et al.* satte denne grensen på 15-20% glimmer. Ut fra resultatene oppnådd i denne masteroppgaven, stemmer samme grense godt overens med andel myke mineraler. Spesielt Figur 4.23 og Figur 4.25 viser en brattere trend etter at andel myke mineraler passerer 15-20%, enn det den hadde for mindre andeler. Den samme trenden kan ikke sies å være synlig for glimmerandel funnet med XRD, men det er verdt å merke seg at ingen materialer passerer 20% glimmer. De manuelle glimmertellingene viser derimot mer glimmerinnhold, og da er en slik grense mer synlig.

I Figur 4.23 til Figur 4.25 er det valgt en lineær trendlinje, selv om det kan se ut til at sammenhengen mellom andel myke mineraler og vekttapene kan være eksponentiell. Ved å bruke regresjonen med M_{DE} (Figur 4.23) som eksempel, endres R^2 -verdien fra 0,82 med lineær trend til 0,97 med eksponentiell. Figuren viser også at de fleste datapunktene er samlet nederst til venstre, mens det er få punkter opp mot høyre, og det er derfor vanskelig å si sikkert om sammenhengen faktisk er eksponentiell.

I løpet av testingen med grove fraksjoner ble det observert at de materialene som oppnådde lav M_{DE} holdt godt på sin opprinnelige fasong. Et godt eksempel på dette er materialene M7 ($M_{DE} = 2$) og M18 ($M_{DE} = 28$) som ligger på hver sin ende av skalaen. Figur 5.4 viser endringen på kornene for begge materialene. Figuren viser at begge materialene beholder kornformen, men at kanter og teksturen endres mye for materiale M18. Disse observasjonene underbygges av litteraturen som påpeker at harde materialer opplever mindre endring i kantetheten enn svake (Ulvik og Erichsen, 2006). Materiale M18 består av 100% myke mineraler, mens materiale M7 kun består av 2% myke mineraler. Tabell 3.4 viser at materiale M7 består av porfyr som er en sterk bergart (Ulvik og Erichsen, 2006). Observasjonene stemmer også godt overens med Quintanilla *et al.* som så at skarpe kanter slites først og at teksturen og kantetheten til materialet endres mer enn selve kornformen (Quintanilla *et al.*, 2019).



Figur 5.4 – M7 og M18 før og etter standard micro-Deval

For å oppsummere dette delkapittelet er det tydelig at mineralsammensetningen har mer innvirkning på micro-Deval-verdiene enn kornform. Dette stemmer også godt overens med tidligere funn (Cook, Tanyu og Yavuz, 2017; Lang *et al.*, 2007).

5.5 Korngradering

Ettersom Annex E ikke beskriver en like nøyaktig kornkurve som Annex D, ble Annex E utført med tre ulike siktefordelinger for to av materialene. Fra Figur 4.17 kommer det frem at verdiene ligger i samme område for alle tre fordelingene. For begge materialene er det høyest vekttap for 0.2/2 mm-fordelingen og lavest for 50/50-fordelingen. Det er også omtrent like stor prosentvis økning mellom de ulike kornfordelingene for begge materialene. Dette kan dog være en tilfeldighet. Det kan trekkes en sammenligning til forskjellen mellom Annex E og Annex D. Annex D har litt større øvre kornstørrelse enn Annex E og for alle materialene er vekttapet mindre for Annex E. Det skal også sies at det kun er utført tester på to materialer, og derfor kan det ikke konkluderes med at dette vil være tilfelle for andre materialer. På den andre siden er det valgt et av de sterkeste og et av de svakeste materialene for å se på ulike ender av spekteret. Siktekurvene i vedlegg 8 viser at ingen av materialene har over 40% av vekten mellom 2 og 4 mm. Dette betyr at en 50/50-fordeling vil ha mer grove korn enn samtlige 0.2/4 mm-fordelinger med uspesifisert kornfordeling. Det stemmer dermed godt overens med litteraturen at 50/50-fordelingen oppnår mindre verdi (Rangaraju og Edlinski, 2008).

Figur 4.27 og Figur 4.28 viser graderingstallet, C_u , plottet mot henholdsvis MM_{DE} og F_S . Fra figurene er det ingen tydelig sammenheng mellom datasettene. Korrelasjonen for F_S er litt høyere enn for MM_{DE} , noe som muligens kan forklares med kornsammensetningene til metodene. Den er forhåndsdefinert for Annex D, mens den ikke er det for Annex E. En annen faktor er at kornene for Annex D går opp til 5.6 mm, mens siktekurvene kun går opp til 4 mm. Forskjellen i sammenheng kan også være tilfeldig. Verdiene i Tabell 4.10 angir at seks av materialene kan klassifiseres som velgradert, mens ingen kan klassifiseres som ensgradert. Resterende tolv materialer har et graderingstall mellom 10 og 15. Ettersom ingen materialer har graderingstall under 10, kan det være at utvalget ikke er representativt for alle graderingstall.

5.6 Feilkilder

I dette delkapittelet diskuteres ulike faktorer som kan ha ført til variasjoner eller uregelmessigheter i resultatene.

EN 1097-1 presiserer en tillatt toleranse for flere parametere, deriblant vann, total kulevekt, kulestørrelse og vekten til testeksemplaret. Ettersom alle disse ble målt opp med nok nøyaktige måleinstrumenter, er sannsynligheten for at en slik feil skal ha påvirkning på resultatene lav. Den eneste av disse som endrer seg er den totale kulevekten og kulestørrelse, ettersom de også vil oppleve slitasje gjennom testingen. Kulestørrelsen ble sjekket før første test, i tillegg til noen ganger i løpet av forsøkene. Den totale vekten til stålkulene ble sjekket før hver kjøring. Ved å gjøre dette ble det også oppdaget om kuler havnet sammen med materialet når det ble satt til tørking eller om enkelte steinkorn ikke hadde blitt fjernet fra kulene. Det kan hende at alle kornene ikke ble oppdaget, men da var de i så fall så små at det hadde liten innvirkning på micro-Deval-verdiene.

Ved utregning av alle micro-Deval-verdiene (M_{DE} , $M_{DE8/11}$, $M_{DE11/16}$, MM_{DE} og F_S) brukes 500 g til utregning for materialenes utgangspunkt, som standardene presiserer. Startvekten har en feilmargin på ± 2 eller ± 3 g avhengig av metode, som da vil ha en liten påvirkning på resultatene, men den anses som neglisjerbar. De faktiske startvektene kan sees i vedlegg 1 til 5. Standardene sier også at gjennomsnittsverdiene fra parallellene skal rundes av til nærmeste heltall, men i denne oppgaven er det benyttet en desimal i alle

figurer. Dette vil også gi litt forskjellige verdier, men heller ikke dette ansees å være en stor faktor.

Som diskutert i delkapittel 5.2 var det en litt annen prosess å behandle de finere materialene enn de grove etter kjøring. Dersom vannstrålen under vasking ble for sterk, eller strålen hadde en litt for brå bevegelse, ble de fineste kornene sprutet opp mot kanten på sikten. I noen tilfeller ble det observert at litt av materialet sprutet over sikten. Dette kan være med å forklare større sprik i verdiene for parallell en og to for Annex D og Annex E sammenlignet med de andre metodene. For Annex D og Annex E var det vanskelig å se når alt materiale mindre enn minste siktåpning hadde passert. Dette kan ha ført til at noe materiale som egentlig skulle hatt passert, ikke gjorde det. Dette gjaldt spesielt for materialer som fikk stor andel nedmaling/nedknusing i løpet av testen. For å redusere denne feilkilden ble det lagt til ekstra beskyttelsessikt ved vasking. For materialer med høy grad av nedknusing ble materialet vasket i flere omganger. Vaskingen ble avsluttet etter at det visuelt ikke ble observert flere korn i vasken på undersiden av sikten. Det har også blitt gjennomført en ringanalyse for testing av Annex D, hvor det ble konkludert med at metoden var godt reproducerbar (Westiner, Wörner og Neidinger, 2015).

En annen feilkilde som kan ha påvirket resultatene er selve sikteprosessen. Dersom for høy amplitude har blitt benyttet, kan siktekurven ikke ha blitt riktig. Dette gjelder spesielt for de finere materialene. Med for høy amplitude vil kornene bli hengende i lufta og ikke ha muligheten til å passere ned til neste sikt. Det er benyttet samme amplitude for alle materialene. En annen årsak til feilkilde kan være overbelastning av siktene. I enkelte tilfeller var det vanskelig å anslå hvor mye materiale som kunne siktes samtidig, ettersom materialene inneholdt ulike kornfordelinger. Dersom det var mistanke om overbelastninger av sikt, ble det gjennomført ny sikting for å forsikre at siktekurven ble riktig. Også for flisighet kan sikteprosessen være en feilkilde. I disse tilfellene utføres siktingen manuelt, i tillegg til at de ble utført av to ulike personer. Den ene har utført for materialene M3, M6 og M17, mens den andre har utført for resten. Hvis det var en vesentlig variasjon i nøyaktighet mellom personene, vil det kunne påvirke flisighetsindeksene.

5.7 Videre arbeid

I dette delkapittelet foreslås videre arbeid. Forslagene tar utgangspunkt i deler av resultatene ikke gir svar på, eller der data mangler for å kunne konkludere. Det er også foreslått arbeid som kan være interessant å se i sammenheng med denne oppgaven.

- Figur 4.23 til Figur 4.25 viser den lineære sammenhengen mellom micro-Deval-verdiene og andel myke mineraler, selv om dette ikke nødvendigvis gir høyest korrelasjon. Ta Figur 4.23 som eksempel. Med lineær regresjon oppnås en R^2 -verdi på 0,82, mens for en eksponentiell sammenheng blir verdien 0,97. Datasettet har mange punkter ned til venstre, mens det er større sprik opp mot høyre. For å finne ut om denne sammenhengen faktisk er eksponentiell, bør det testes materialer som gir data i det manglende området.
- For å oppnå større sikkerhet angående korrelasjonen mellom graderingstallet og micro-Deval-verdiene, bør det også legges til mer data i analysene, ettersom ingen av materialene i denne oppgaven hadde $C_u < 10$.

- Ettersom størrelsesforholdet mellom stålkulene og fraksjonene som foreslås i Annex D og Annex E ligner mer på forholdet i Los Angeles-metoden enn for standard micro-Deval, ville det vært interessant å sammenligne Los Angeles opp mot Annex D og Annex E. Annet videre arbeid som involverer kulestørrelse, er å se på hvor stor innvirkning endringen i kulestørrelse har å si for resultatene. Det kan også være interessant å se hvordan resultatene fra standard micro-Deval, Annex D og Annex E sammenlignes med en micro-Deval-metode for fine fraksjoner som benytter seg av samme størrelse på kulene som standard gjennomføring, tilsvarende det som pågår i Sverige (Artursson, Englund og Stenlid, 2022).
- Testeksemplarene som er benyttet til testing for Annex D følger en ganske bestemt siktekurve. Derfor vil det være mulig å se forskjellen på kornkurven før og etter testing i henhold til denne utførelsen. Dette kan være interessant å se på ettersom Hossain et al. fant at forskjellen mellom siktekurvene før og etter testing på fine fraksjoner ga bedre sammenheng med erfaringsbasert evaluering av materialer enn det standard veieprosedyre gjorde (Hossain, Lane og Schmidt, 2008a). En parallell for hvert materiale er tatt vare på for at en slik gjennomføring skal være mulig. Det bør imidlertid utføres flere analyser enn dette for å oppnå pålitelige resultater.
- Ved testing på tre ulike kornfordelinger for Annex E viste resultatene en indikasjon på at det kan være en sammenheng mellom kornfordelingen og F_s . Ettersom det kun ble sett på to materialer er det ikke mulig å trekke en konklusjon. Om det ønskes å se om denne sammenhengen er reell, bør det derfor utføres tester på flere materialer. Resultatene som framkommer ved en eventuell videre analyse, bør også sees i sammenheng med siktekurvene til materialene.
- Det er en tydelig forskjell mellom vekttapene etter utføring i henhold til Annex D og Annex E. Forskjellen mellom metodene er kun, ulik minste siktåpning og en liten endring i fraksjonen som brukes. Ettersom det kun er to parametere som varierer mellom de to metodene, burde det være mulig å finne ut hvor stor innvirkning disse to parameterne har å si for resultatene.
- I denne oppgaven er det, med ett unntak, ikke undersøkt materialer med micro-Deval-verdier over 30. Det kan være interessant å se sammenhengen mellom standard micro-Deval og testing etter Annex D og Annex E for materialer i dette området.
- Det kan også være en mulighet å se på eventuelle geologiske årsaker til de endringene i verdier materialene får ved de forskjellige utførelsene. Dersom gode sammenhenger etableres vil det gi bedre grunnlag for å vurdere om og eventuelt hvilke krav som bør stilles til testing etter Annex D og Annex E.

6 Konklusjon

Ut fra arbeidet i denne masteroppgaven med bruk av materialer med spenn i egenskaper som micro-Deval-verdi, Los Angeles-verdi og glimmerinnhold, kan det trekkes følgende konklusjoner:

- Testing av 18 materialer etter standard micro-Deval og etter Annex C tyder på at fraksjonene 8/11.2 og 11.2/16 mm kan testes i micro-Deval istedenfor referansefraksjonen 10/14 mm, samtidig som kravene opprettholdes. Resultatene viser nesten 1:1 sammenheng mellom M_{DE} og både $M_{DE8/11}$ og $M_{DE11/16}$ med en korrelasjon tilnærmet lik 1.
- For testing av 19 materialer etter standard micro-Deval, Annex D og Annex E tyder resultatene fra 18 av dem på at det er en moderat korrelasjon mellom M_{DE} og MM_{DE} , og en moderat til god korrelasjon mellom M_{DE} og F_S . Ved å inkludere avviksmaterialet M17 i analysen oppnås ingen korrelasjon for disse sammenhengene. Dersom det blir sett på en logaritmisk sammenheng, oppnås en moderat til god korrelasjon mellom M_{DE} og begge forholdstallene MM_{DE}/M_{DE} og F_S/M_{DE} . Resultatene viser en moderat til god korrelasjon mellom MM_{DE} og F_S for alle 19 materialene. Verdiene fra testing etter Annex D og Annex E er en del høyere enn for standard micro-Deval, men ut fra resultatene i denne oppgaven er det vanskelig å fastslå hvor stor innvirkning hver enkel forskjell i metodene har.
- Fra resultatene i oppgaven og litteratursøket ser det ut til at mineralogien har større innvirkning på micro-Deval-verdiene enn graderingstall og den ikke-standardiserte flisigheten:
 - Resultatene fra sammenligning av micro-Deval-verdier fra standard micro-Deval, Annex D og Annex E med andelen myke mineraler for 15 materialer tyder på at det er god korrelasjon for M_{DE} , og moderat til god korrelasjon for MM_{DE} og F_S .
 - Ved å sammenligne den ikke-standardiserte flisighetsindeksen, $FI_{0.8}$, med micro-Deval-verdier fra Annex D og Annex E for 19 materialer tyder resultatene på at det er liten korrelasjon for MM_{DE} , og liten til moderat korrelasjon for F_S .
 - Ved å sammenligne graderingstallet, C_u , med micro-Deval-verdiene fra Annex D og Annex E for 18 materialer tyder resultatene på at det er liten til moderat korrelasjon for MM_{DE} , og moderat korrelasjon for F_S . Det er usikkert om utvalget er representativt, ettersom ingen av materialene er ensgraderte.

Referanser

Adomako, S. *et al.* (2021) Review of the relationship between aggregates geology and Los Angeles and micro-Deval tests, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(3). <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02097-y>

ADOT (2018) Alaska Test Methods Manual (s. 312-311 - 312-314). dot.alaska.gov: Alaska Department of Transportation and Public Facilities.

ADOT (2020) Standard Specification for Highway Construction - 2020 Edition (s. 107-145). dot.alaska.gov: Alaska Department of Transportation and Public Facilities.

Artursson, C., Englund, J. og Stenlid, L. (2022) Analys av nötningsbeständigheten på borrhax, i *Metoddagen 2022, Sverige*. Asfaltskolan.

ASTM (2014) ASTM C131/C131M-14 - Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine (s. 1-5). astm.org: ASTM International.

ASTM (2015) ASTM D7428-15 - Standard Test Method for Resistance of Fine Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus (s. 1-6). astm.org: ASTM International.

ASTM (2016) ASTM C535-16 - Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine (s. 1-3). astm.org: ASTM International.

ASTM (2017) ASTM D6928-17 - Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus (s. 1-6). astm.org: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6928-17>

Benediktsson, S. (2015) *Effects of Particle Shape on Mechanical Properties of Aggregates*, Masteroppgave ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU.

Capik, M. og Yilmaz, A. O. (2017) Modeling of Micro Deval abrasion loss based on some rock properties, *Journal of African Earth Sciences*, 134, s. 549-556.

CCIL (2019) *Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus - ASTM D6928 - 17*. Canadian Council of Independent Laboratories.

CEN (2008) EN 13043 - Tilslag for bituminøse masser og overflatebehandlinger for vegger, flyplasser og andre trafikkarealer (s. 14). standard.no: Standard Norge.

CEN (2009) EN 13242 - Tilslag for mekanisk stabiliserte og hydraulisk stabiliserte materialer til bruk i bygg- og anleggsarbeid og vegbygging (s. 12-13). standard.no: Standard Norge.

CEN (2011) EN 1097-1 - Prøvningsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag - Del 1: Bestemmelse av motstand mot slitasje (micro-Deval) (s. 1-14). standard.no: Standard Norge.

CEN (2014) EN 1097-9 - Prøvningsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag - Del 9: Bestemmelse av motstand mot piggdekkslitasje - Nordisk metode (s. 1-16). standard.no: Standard Norge.

CEN (2020) EN 1097-2 - Prøvningsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag – Del 2: Metoder for bestemmelse av motstand mot knusing (s. 1-48). standard.no: Standard Norge.

CEN (2021) prEN 1097-1 - Test for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval) (s. 1-10, 16-21).

Cook, C. S., Tanyu, B. F. og Yavuz, A. B. (2017) Effect of Particle Shape on Durability and Performance of Unbound Aggregate Base, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2). <https://doi.org/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001752>

Czinder, B. og Török, A. (2021) Strength and abrasive properties of andesite: relationships between strength parameters measured on cylindrical test specimens and micro-Deval values—a tool for durability assessment, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(12), s. 8871-8889. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01983-9>

Erichsen, E. (2001) *Revisjon av statens vegvesen håndbok 018 - Vegbygging. Bidrag fra NGUs Pukkdatabase med statistikk og fysiske egenskaper.* (NGU rapporter). ngu.no: Norges geologiske undersøkelse, NGU.

Erichsen, E. (2006) *Krav til materialtekniske egenskaper for bære- og forsterkningslag.* (NGU rapporter). ngu.no: Norges geologiske undersøkelse, NGU.

Erichsen, E., Ulvik, A. og 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, s. 333-337.

Erichsen, E. (2013) *Vurdering av testmetoder for tilslagsmaterialer.* (Statens vegvesens rapporter). vegvesen.brage.unit.no: Statens vegvesen.

Erichsen, E. (2014) *Bruk av kulemølle og micro-Deval for tilsagsmateriale til vegformål. En vurdering av kravspesifikasjoner.* (NGU rapporter). ngu.no: Norges geologiske undersøkelse, NGU.

Fournari, R. og Ioannou, I. (2019) Correlations between the Properties of Crushed Fine Aggregates, *Minerals*, 9(2), s. 1-22. <https://doi.org/10.3390/min9020086>

Gökalp, I., Uz, V. E. og Saltan, M. (2016) Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro Deval apparatus with different standard test methods, *Construction and Building Materials*, 123, s. 1-7.

Hoff, I. (2016) Frost protection of roads, *Forelesningsnotat i TBA4218 Vegteknologi ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU*, s. 1-12.

Hofstad, K. (2021) *CEN (Den europeiske standardiseringsorganisasjonen)*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/CEN_-_Den_europeiske_standardiseringsorganisasjonen (Hentet: 27.11.2021).

Hossain, M. S., Lane, D. S. og Schmidt, B. N. (2008a) Use of the Micro-Deval Test for Assessing Fine Aggregate Durability, *Journal of the Transportation Research Board*, 2059(1), s. 11-19. <https://doi.org/10.31141/2059-02>

Hossain, M. S., Lane, D. S. og Schmidt, B. N. (2008b) Results of Micro-Deval test for coarse aggregates from Virginia sources, *Transportation Research Record*, (2059), s. 1-10. <https://doi.org/10.3141/2059-01>

Lane, D. S. *et al.* (2011) Modified Micro-Deval Procedure for Evaluating the Polishing Tendency of coarse Aggregates, *Transportation Research Record*, (2232), s. 34-43. <https://doi.org/10.3141/2232-04>

Lang, A. P. *et al.* (2007) Prediction of Coarse Aggregate Performance by Micro-Deval and Other Soundness, Strength, and Intrinsic Particle Property Tests, *Journal of the Transportation Research Board*, 2026, s. 3-8. <https://doi.org/10.3141/2026-01>

Lui, J., Zhao, S. og Mullin, A. (2017) Laboratory assessment of Alaska aggregates using Micro-Deval test, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(1), s. 27-34. <https://doi.org/10.1007/s11709-016-0359-5>

MTIBC (2020) 2020 Standard specification for Highway Construction (s. 1-470). gov.bc.ca: Ministry og Transportation and Infrastructure British Columbia.

NGF (2011) *Veiledning for symboler og definijoner i geoteknikk - Identifisering og klassifisering av jord*. ngf.no: Norsk geoteknisk forening, NGF.

NGU (2022a) *Analyseresultater for pukkområde*. Tilgjengelig fra: https://geo.ngu.no/api/faktaark/grus_pukk/visAnalyserOmr.php?objid=41757 (Hentet: 22.05.2022).

NGU (2022b) *Grus og pukk - Grus- og pukkkforekomster*. Tilgjengelig fra: https://geo.ngu.no/kart/grus_pukk_mobil/ (Hentet: 23.05.2022).

Nålsund, R. (2014) *Railway Ballast Characteristics, Selection Criteria and Performance*, Doktorgradsavhandling ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU.

Ortiz, E. M. og Mahmoud, E. (2014) Experimental procedure for evaluation of coarse aggregate polishing resistance, *Transportation Geotechnics*, 1(3), s. 106 - 118. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.06.001>

Quintanilla, I. D. *et al.* (2017) Wear of sharp aggregates in a rotating drum, *EPJ Web of Conferences*, 140. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714007009>

Quintanilla, I. D. *et al.* (2019) X-ray CT analysis of the evolution of ballast grain morphology along a Micro-Deval test: key role of the asperity scale, *Granular Matter*, 21(2). <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0881-y>

Rangaraju, P. R. og Edlinski, J. (2008) Comparative Evaluation of Micro-Deval Abrasion Test with Other Toughness/Abrasion Resistance and Soundness Tests, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(5), s. 343-351. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:5\(343\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:5(343))

Richard, J. A. og Scarlett, J. R. (1997) *Airport Engineering - Art-024 - A Review and Evaluation of the micro-Deval Test*. Ottawa, Canada: Public Works and GOvernment Services Canada.

Statens vegvesen (1996) Skadekatalog for bituminøse vegdekker (s. 10-11): Statens vegvesen.

Statens vegvesen (1999) Håndbok 018 - Vegbygging. Oslo: Statens vegvesen.

Statens vegvesen (2005) Håndbok 018 - Vegbygging. Oslo: Statens vegvesen.

Statens vegvesen (2011) Håndbok 018 Vegbygging. Oslo: Statens vegvesen.

Statens vegvesen (2014a) *Planlegging og utførelse av kompremeringarbeid*. (Statens vegvesens rapporter).

Statens vegvesen (2014b) Håndbok 018 Vegbygging. Oslo: Statens Vegvesen.

Statens vegvesen (2018a) Håndbok N200 Vegbygging. Oslo: Statens vegvesen.

Statens vegvesen (2018b) *Stein avgjerande for vegkvalitet*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/riksveg/rv36seljorstrondi/nyhetsarkiv/stein-avgjerande-for-vegkvalitet/> (Hentet: 15.05.2022).

Statens vegvesen (2019) *Retningslinjer asfalt 2019*. Statens vegvesen.

Statens vegvesen (2020) *Hvor mange kilo asfaltstøv slites opp?* Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/om-oss/presse/aktuelt/nasjonalt/hvor-mange-kilo-asfaltstov-slites-opp-i-aret-pa-to-mil/> (Hentet: 15.05.2022).

Statens vegvesen (2021) *N200 Vegbygging*. Tilgjengelig fra: <https://svv-cm-sv-apppublic-prod.azurewebsites.net/product/859924/nb#id-cc26d56b-d0c1-4710-d782-de7cb8bf306e> (Hentet: 16.11.2021).

Stenlid, L. (2000) *Slutrapport SBUF prosjekt nr 5002*. SKANSKA Sverige AB.

Strzałkowski, P. og Kaźmierczak, U. (2021) Wear and fragmentation resistance of mineral aggregates — a review of micro-deval and los angeles tests, *Materials*, 14(18), s. 1-16. <https://doi.org/10.3390/ma14185456>

Takarli, M., Phelipot-Mardele, A. og Prince, W. (2009) Adaptation of the micro-deval test for assessing the surface weathering degree of granite, *Journal of ASTM International*, 6(9), s. 1-11. <https://doi.org/10.1520/JAI102251>

Tanyu, B. F., Yavuz, A. B. og Ullah, S. (2017) A parametric study to improve suitability of micro-deval test to assess unbound base coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, 147, s. 328-338. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.173>

Trafikverket (2011a) TRVKB 10 Obundna lager- Trafikverkets Krav Beksrivningstexter för Obundna material i vägkonstruksjon (s. 1-75): Trafikverket.

Trafikverket (2011b) TRVKB Bitumenbundne lagre (s. 1-109): Trafikverket.

Ulvik, A. og Erichsen, E. (2006) *Delprosjekt 1 og 2 – Steinkvalitet og sporutvikling i vegdekker (SIV)*. (NGU rapporter). ngu.no: Norges geologiske undersøkelse, NGU.

Vinje, M. (In prep.) *Studie av metylenblå- og sandekvivalentmetoden for materialer til asfalttilslag*, Masteroppgave ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU.

Wang, D. *et al.* (2015) Evaluation of aggregate resistance to wear with Micro-Deval test in combination with aggregate imaging techniques, *Wear*, 338-339, s. 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.07.002>

Westiner, E., Wörner, T. og Neidinger, S. (2015) Bestimmung der Verfahrenspräzision des Modifizierten Micro-Deval-Verfahrens nach TP Gestein-StB, Teil 5.5.3, *Teil Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, V(1), s. 129-133.

Wikse, K. A. (2022) *Piggdekk*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/piggdekk> (Hentet: 15.05.2022).

WSDOT (2020) Standard Specifications for Road, Bridge and Municipal Construction (s. 9-17 - 19-21): Washington State - Department of Transportation.

Wu, J. *et al.* (2018) Analysis of coarse aggregate performance based on the modified Micro Deval abrasion test, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(2), s. 185-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.10.007>

Vedlegg

Vedlegg 1: Spesifikke data for 10/14 mm

Vedlegg 2: Spesifikke data for 8/11.2 mm

Vedlegg 3: Spesifikke data for 11.2/16 mm

Vedlegg 4: Spesifikke data for Annex D

Vedlegg 5: Spesifikke data for Annex E

Vedlegg 6: Materialsammensetning M3 og M8

Vedlegg 7: Glimmerandel

Vedlegg 8: Siktekurver

Vedlegg 1: Spesifikke data for 10/14 mm

	Parallell 1					
Material	10/11.2 [g]	11.2/14 [g]	Total [g]	Gjenværende [g]	Gjennomgang [g]	M_{DE}
M1	174,6	326,0	500,6	402,1	98,5	19,6
M2	174,8	325,4	500,2	411,7	88,5	17,7
M3	175,5	325,0	500,5	428,2	72,3	14,4
M4	176,0	325,1	501,1	444,1	57,0	11,2
M5	173,8	325,9	499,7	479,3	20,4	4,1
M6	174,2	325,5	499,7	474,3	25,4	5,1
M7	175,8	323,5	499,3	488,7	10,6	2,3
M8	175,3	323,4	498,7	464,9	33,8	7,0
M9	174,2	325,4	499,6	478,9	20,7	4,2
M10	176,7	322,8	499,5	453,5	46,0	9,3
M11	176,9	323,1	500,0	484,1	15,9	3,2
M12	174,1	325,6	499,7	481,1	18,6	3,8
M13	176,0	323,1	499,1	430,3	68,8	13,9
M14	174,9	324,9	499,8	456,7	43,1	8,7
M15	176,6	323,9	500,5	449,8	50,7	10,0
M16	174,8	324,9	499,7	477,5	22,2	4,5
M17	-	-	-	-	-	-
M18	176,0	325,0	501,0	359,0	142,0	28,2
M19	176,6	322,9	499,5	442,9	56,6	11,4

	Parallell 2					
Material	10/11.2 [g]	11.2/14 [g]	Total [g]	Gjenværende [g]	Gjennomgang[g]	M_{DE}
M1	175,3	323,7	499,0	399,2	99,8	20,2
M2	175,8	323,8	499,6	411,4	88,2	17,7
M3	175,1	326,4	501,5	427,9	73,6	14,4
M4	174,8	325,3	500,1	443,2	56,9	11,4
M5	176,7	323,6	500,3	478,9	21,4	4,2
M6	175,9	325,7	501,6	476,7	24,9	4,7
M7	176,8	324,9	501,7	490,8	10,9	1,8
M8	176,3	324,9	501,2	468,3	32,9	6,3
M9	176,8	324,1	500,9	482,7	18,2	3,5
M10	174,8	324,2	499,0	453,7	45,3	9,3
M11	174,5	326,9	501,4	484,7	16,7	3,1
M12	174,5	325,1	499,6	481,6	18,0	3,7
M13	175,1	324,2	499,3	436,6	62,7	12,7
M14	175,4	323,8	499,2	458,3	40,9	8,3
M15	175,9	324,7	500,6	450,3	50,3	9,9
M16	175,0	324,5	499,5	481,0	18,5	3,8
M17	-	-	-	-	-	-
M18	175,1	325,4	500,5	359,4	141,1	28,1
M19	173,4	324,7	498,1	445,6	52,5	10,9

Vedlegg 2: Spesifikke data for 8/11.2 mm

	Parallell 1					
Material	8/10 [g]	10/11.2 [g]	Total [g]	Gjenværende [g]	Gjennomgang [g]	M_{DE}
M1	324,6	175,1	499,7	393,5	106,2	21,3
M2	325,7	174,1	499,8	408,8	91,0	18,2
M3	325,5	174,0	499,5	415,1	84,4	17,0
M4	325,0	175,6	500,6	439,3	61,3	12,1
M5	325,5	174,0	499,5	479,0	20,5	4,2
M6	325,9	175,0	500,9	471,7	29,2	5,7
M7	325,8	173,5	499,3	487,3	12,0	2,5
M8	325,3	174,1	499,4	458,2	41,2	8,4
M9	324,7	175,3	500,0	478,7	21,3	4,3
M10	323,5	175,6	499,1	444,8	54,3	11,0
M11	325,8	173,9	499,7	480,7	19,0	3,9
M12	325,3	175,5	500,8	481,2	19,6	3,8
M13	325,9	175,6	501,5	441,6	59,9	11,7
M14	325,4	174,5	499,9	456,9	43,0	8,6
M15	326,5	174,7	501,2	448,6	52,6	10,3
M16	326,3	173,3	499,6	477,4	22,2	4,5
M17	-	-	-	-	-	-
M18	324,6	174,6	499,2	360,1	139,1	28,0
M19	325,5	174,1	499,6	445,7	53,9	10,9

	Parallell 2					
Material	8/10 [g]	10/11.2 [g]	Total [g]	Gjenværende [g]	Gjennomgang [g]	M_{DE}
M1	324,6	174,9	499,5	397,4	102,1	20,5
M2	350,0	150,0	500,0	399,7	100,3	20,1
M3	324,2	176,0	500,2	423,5	76,7	15,3
M4	325,5	174,5	500,0	441,9	58,1	11,6
M5	324,2	176,1	500,3	478,6	21,7	4,3
M6	323,9	178,0	501,9	471,8	30,1	5,6
M7	324,7	175,5	500,2	489,0	11,2	2,2
M8	325,0	174,5	499,5	460,0	39,5	8,0
M9	325,8	173,4	499,2	479,0	20,2	4,2
M10	326,9	172,4	499,3	448,5	50,8	10,3
M11	326,6	175,0	501,6	480,4	21,2	3,9
M12	325,2	173,6	498,8	477,4	21,4	4,5
M13	326,0	174,1	500,1	434,6	65,5	13,1
M14	325,9	174,0	499,9	456,7	43,2	8,7
M15	325,2	175,5	500,7	445,5	55,2	10,9
M16	325,4	174,0	499,4	477,5	21,9	4,5
M17	-	-	-	-	-	-
M18	325,1	175,3	500,4	361,2	139,2	27,8
M19	325,3	174,8	500,1	444,4	55,7	11,1

Vedlegg 3: Spesifikke data for 11.2/16 mm

	Parallell 1					
Material	11.2/14 [g]	14/16 [g]	Total [g]	Gjenværende [g]	Gjennomgang [g]	M_{DE}
M1	324,7	174,8	499,5	394,9	104,6	21,0
M2	324,5	176,7	501,2	400,0	101,2	20,0
M3	326,3	175,1	501,4	429,7	71,7	14,1
M4	324,9	174,0	498,9	445,9	53,0	10,8
M5	326,6	173,0	499,6	478,8	20,8	4,2
M6	326,2	173,7	499,9	478,5	21,4	4,3
M7	325,8	173,9	499,7	487,5	12,2	2,5
M8	324,0	174,6	498,6	464,6	34,0	7,1
M9	326,8	174,9	501,7	485,3	16,4	2,9
M10	323,1	176,8	499,9	453,8	46,1	9,2
M11	326,6	173,9	500,5	486,9	13,6	2,6
M12	324,2	177,4	501,6	484,9	16,7	3,0
M13	325,0	176,7	501,7	440,1	61,6	12,0
M14	324,2	176,1	500,3	462,6	37,7	7,5
M15	325,3	175,4	500,7	451,7	49,0	9,7
M16	324,8	174,2	499,0	482,5	16,5	3,5
M17	-	-	-	-	-	-
M18	324,6	175,6	500,2	355,8	144,4	28,8
M19	326,7	173,1	499,8	451,8	48,0	9,6

	Parallell 2					
Material	11,2/14 [g]	14/16 [g]	Total [g]	Gjenværende [g]	Gjennomgang [g]	M_{DE}
M1	325,8	175,2	501,0	396,2	104,8	20,8
M2	326,0	175,7	501,7	413,8	87,9	17,2
M3	324,4	174,3	498,7	430,2	68,5	14,0
M4	324,0	174,7	498,7	442,0	56,7	11,6
M5	324,2	174,5	498,7	477,6	21,1	4,5
M6	325,6	174,2	499,8	476,2	23,6	4,8
M7	323,2	177,6	500,8	489,0	11,8	2,2
M8	324,0	177,9	501,9	472,1	29,8	5,6
M9	324,5	176,3	500,8	484,6	16,2	3,1
M10	323,8	177,4	501,2	454,3	46,9	9,1
M11	324,9	175,9	500,8	487,1	13,7	2,6
M12	326,0	174,1	500,1	483,3	16,8	3,3
M13	325,7	175,9	501,6	444,3	57,3	11,1
M14	325,5	173,8	499,3	460,4	38,9	7,9
M15	325,2	174,3	499,5	449,8	49,7	10,0
M16	325,4	175,5	500,9	481,3	19,6	3,7
M17	-	-	-	-	-	-
M18	326,8	174,1	500,9	359,1	141,8	28,2
M19	326,6	172,8	499,4	445,1	54,3	11,0

Vedlegg 4: Spesifikke data for Annex D

Material	Parallell 1							MM _{DE}
	Total [g]	4/5.6 [g]	2/4 [g]	1/2 [g]	0.5/1 [g]	0.25/0.5 [g]	Gjenværende [g]	
M1	501,0	59,7	140,8	115,1	86,3	99,1	314,4	37,1
M2	500,5	59,6	141,3	114,0	86,4	99,2	394,7	21,1
M3	-	-	-	-	-	-	423,5	15,3
M4	500,9	60,0	140,3	114,4	85,5	100,7	412,1	17,6
M5	500,5	60,1	140,5	114,6	85,7	99,6	434,4	13,1
M6	500,8	59,9	140,1	115,4	84,5	100,9	409,3	18,1
M7	500,3	60,0	140,0	115,1	85,1	100,1	429,6	14,1
M8	-	-	-	-	-	-	384,9	23,0
M9	500,6	61,0	139,0	115,4	84,9	100,3	420,5	15,9
M10	500,7	60,1	140,3	114,5	85,2	100,6	428,4	14,3
M11	501,1	59,9	140,3	115,6	83,9	101,4	415,1	17,0
M12	500,4	60,2	140,1	115,0	85,2	99,9	428,5	14,3
M13	501,7	60,0	141,2	114,9	85,4	100,2	445,9	10,8
M14	500,1	59,8	140,7	114,9	85,6	99,1	420,0	16,0
M15	499,7	59,9	140,3	115,5	85,7	98,3	425,8	14,8
M16	501,5	61,1	140,4	113,5	86,7	99,8	422,2	15,6
M17	500,3	60,0	140,8	114,9	83,7	100,9	400,5	19,9
M18	500,5	61,4	140,0	115,6	85,3	98,2	302,8	39,4
M19	500,0	60,8	139,8	114,8	86,2	98,4	321,6	35,7

Material	Parallell 2							MM _{DE}
	Total [g]	4/5.6 [g]	2/4 [g]	1/2 [g]	0.5/1 [g]	0.25/0,5 [g]	Gjenværende [g]	
M1	501,0	60,1	141,2	115,4	84,3	100,0	316,3	36,7
M2	500,6	61,0	140,2	115,0	85,0	99,4	368,6	26,3
M3	-	-	-	-	-	-	420,8	15,8
M4	500,3	60,3	140,0	115,4	84,6	100,0	407,0	18,6
M5	501,3	59,9	141,1	114,2	85,5	100,6	436,2	12,8
M6	500,5	59,4	141,6	114,7	83,9	100,9	404,6	19,1
M7	501,3	60,4	140,0	114,8	85,2	100,9	432,0	13,6
M8	-	-	-	-	-	-	386,9	22,6
M9	501,1	61,2	139,3	115,6	84,9	100,1	413,5	17,3
M10	500,0	60,0	140,3	114,8	85,9	99,0	425,4	14,9
M11	501,0	60,0	140,0	115,6	86,6	98,8	422,6	15,5
M12	500,9	49,9	149,9	113,5	87,1	100,5	432,8	13,4
M13	501,0	60,2	140,1	116,4	84,7	99,6	435,9	12,8
M14	500,2	60,4	140,0	115,0	84,6	100,2	432,5	13,5
M15	501,6	60,7	141,0	115,1	83,7	101,1	420,4	15,9
M16	500,5	59,6	140,0	116,9	84,1	99,9	414,3	17,1
M17	500,6	60,0	140,6	115,5	85,1	99,4	396,1	20,8
M18	501,8	60,8	139,4	115,2	85,2	101,2	307,3	38,5
M19	500,2	60,2	140,6	114,5	85,6	99,3	306,7	38,7

Vedlegg 5: Spesifikke data for Annex E

Material	Parallell 1			Parallell 2		
	Vekt start [g]	Gjenværende [g]	F_s	Vekt start [g]	Gjenværende [g]	F_s
M1	500,5	219,3	56,1	500,3	212,6	57,5
M2	499,6	196,5	60,7	500,1	216,7	56,7
M3	-	306,3	38,7	-	287,1	42,6
M4	500,4	361,5	27,7	500,5	354,2	29,2
M5	500,2	402,6	19,5	500,9	407,5	18,5
M6	500,5	384,3	23,1	500,4	379,9	24,0
M7	500,1	395,3	20,9	499,9	394,2	21,2
M8	-	351,4	29,7	-	347,2	30,6
M9	499,6	344,4	31,1	499,8	344,7	31,1
M10	500,2	361,6	27,7	500,2	359,8	28,0
M11	500,2	345,6	30,9	500,2	350,5	29,9
M12	500,6	392,3	21,5	499,7	388,4	22,3
M13	500,2	374,7	25,1	501,0	389,0	22,2
M14	500,2	366,5	26,7	499,7	367,5	26,5
M15	499,5	318,0	36,4	499,9	319,5	36,1
M16	499,9	376,9	24,6	499,6	371,2	25,8
M17	499,9	331,4	33,7	449,7	356,9	28,6
M18	500,1	194,9	61,0	499,7	161,2	67,8
M19	500,7	239,6	52,1	501,6	253,1	49,4

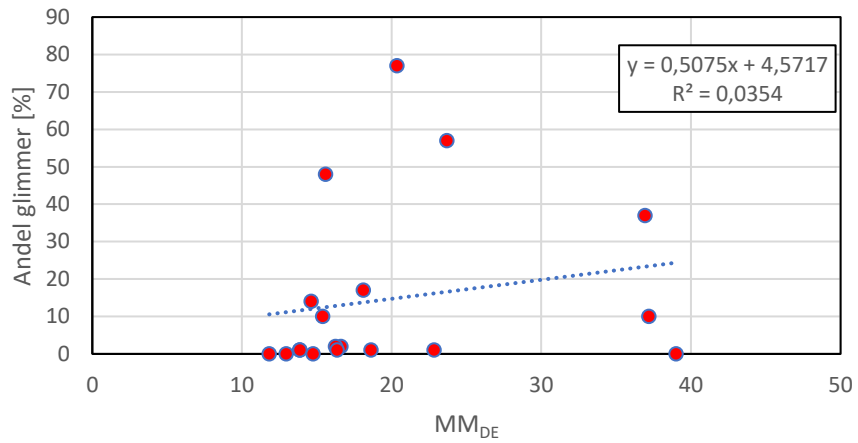
Fordeling	Parallell 1				Parallell 2			
	0.2/2 [g]	Total [g]	Gjenværende [g]	F_s	0.2/2 [g]	Total [g]	Gjenværende [g]	F_s
M1 50/50	249,7	499,8	238,5	52,3	250,1	500,7	237,0	52,6
M1 0.2/2	-	500,0	195,8	60,8	-	499,6	204,8	59,0
M7 50/50	249,8	500,7	399,8	20,0	249,3	499,5	399,9	20,0
M7 0.2/2	-	499,4	383,1	23,4	-	499,6	383,1	23,4

Vedlegg 6: Materialsammensetning M3 og M8

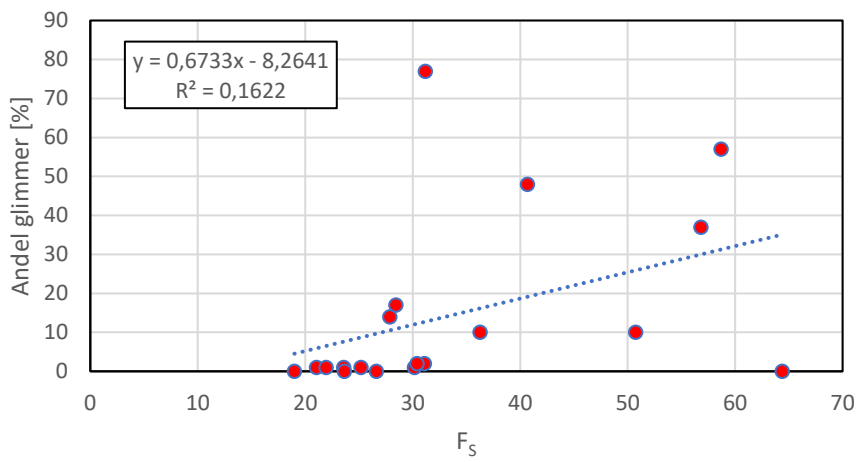
Annex D					
Fraksjon [mm]	Vekt [g]				
	Ønsket	M3		M8	
		Parallell 1	Parallell 2	Parallell 1	Parallell 2
0,25/0,355	42,0	41,9	41,9	42,0	42,0
0,355/0,5	58,0	58,0	58,0	58,0	57,9
0,5/0,71	35,9	35,7	35,7	35,6	35,7
0,71/1,0	49,3	49,3	49,2	49,3	49,2
1,0/1,4	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0
1,4/2,0	69,1	69,0	69,0	69,0	69,0
2,0/2,8	56,0	55,9	56,0	55,9	55,9
2,8/4,0	84,0	84,0	84,1	84,0	84,0
4,0/5,6	60,0	60,1	60,1	59,9	60,0
Totalt:	500,3	499,9	500,0	499,7	499,7

Annex E					
Fraksjon [mm]	Vekt [g]				
	Ønsket	M3		M8	
		Parallell 1	Parallell 2	Parallell 1	Parallell 2
0,2/0,25	6,6	6,7	6,7	6,6	6,7
0,25/0,355	13,8	13,8	13,9	13,8	13,8
0,355/0,5	19,1	19,1	19,2	19,2	19,1
0,5/0,71	27,6	27,7	27,6	27,6	27,5
0,71/1,0	38,2	38,3	38,2	38,2	38,1
1,0/1,4	52,6	52,7	52,6	52,6	52,5
1,4/2,0	78,9	79,0	79,0	78,9	78,9
2,0/2,8	105,3	105,2	105,4	105,3	105,3
2,8/4,0	157,9	158,0	157,9	157,9	157,9
Totalt:	500,0	500,5	500,5	500,1	499,8

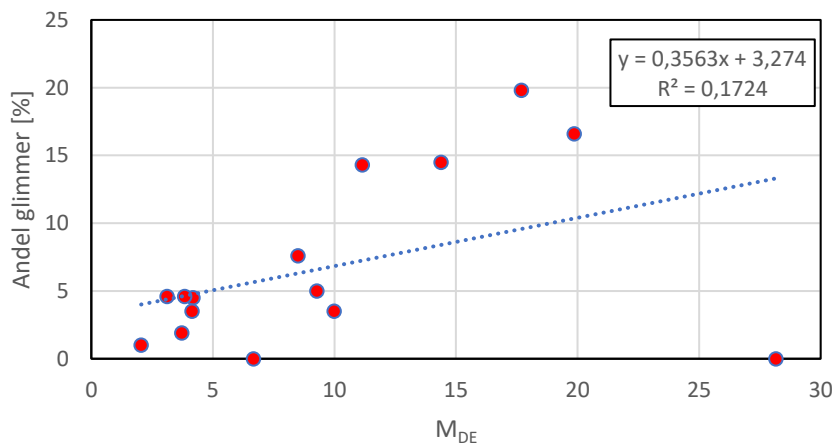
MM_{DE} mot andel glimmer (glimmertelling)

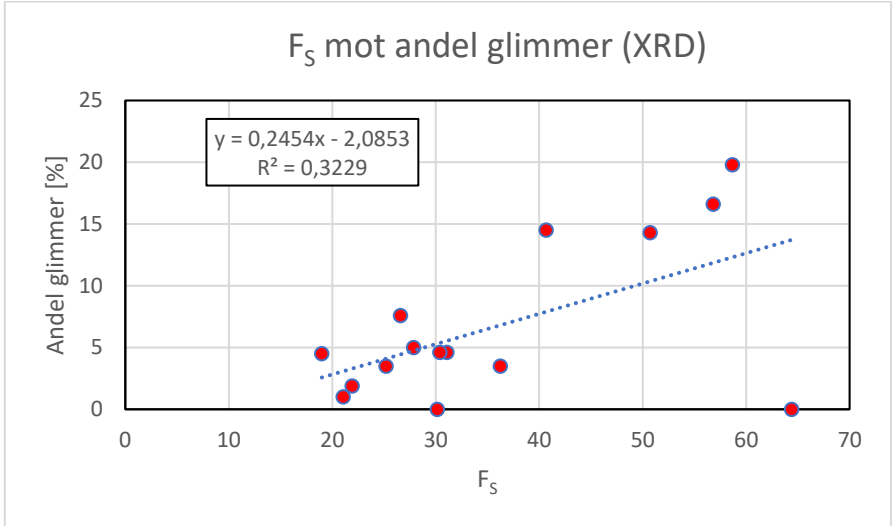
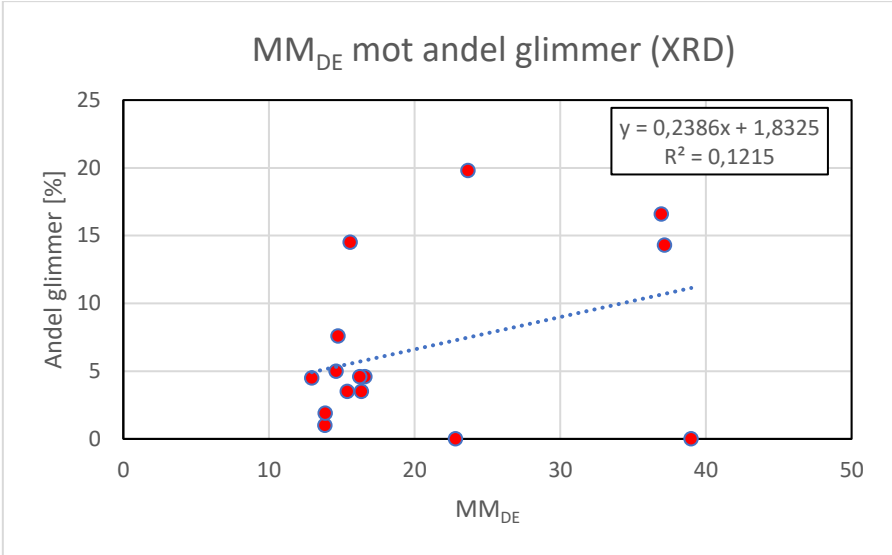


F_S mot andel glimmer (glimmertelling)



M_{DE} mot andel glimmer (XRD)





Vedlegg 8: Siktekurver

