

Dokument: SASAK-RAP-ME-AKS-FI-0003-01

# **Eksperimentel bestemmelse af friktionskoefficienter for boltede aluminiumsamlinger**

SASAK  
Projekt 5 - Mekanisk sammenføjning

Ashkan Mataji og Gunnar Sørensen

FORCE Instituttet, maj 2001

## Abstract

Eksisterende normer for aluminiumkonstruktioner angiver kun i begrænset omfang friktionskoefficienter for kontaktfladerne i forspændte friktionssamlinger, og bæreevnen må derfor i de fleste tilfælde eftervises ved prøvning.

I den foreløbige europæiske norm for aluminiumkonstruktioner Eurocode 9 er der anført friktionskoefficienter for en enkelt standard overfladekvalitet.

Det er karakteristisk, at friktionskoefficienterne i normen afhænger af den totale godstykkelse af samlingselementerne.

Der er under SASAK projektet udført en testserie for bestemmelse af friktions-koefficienten for standard overfladekvaliteten og for en friktionssamling uden krav til overfladeruheden.

Forsøgene har vist en tydelig tendens til stigende friktionskoefficienter for tiltagende godstykkelse af friktionssamlingerne, som angivet i Eurocode 9.

De målte friktionskoefficienter for samlingselementer uden krav til overfladekvaliteten forekommer rimelige i forhold til forventningerne.

Målingerne på standardoverfladen ifølge Eurocode 9 indikerer derimod, at forskrifterne i konstruktionsnormen kan være for optimistiske.

## Normbestemte friktionskoefficienter

Eurocode 9 angiver friktionskoefficienten for en sandblæst overflade til kvaliteten N 10a efter ISO 468/1302 svarende til overfladeruheden Ra 12,5.

Friktionskoefficienten afhænger af den totale godstykkelse af friktionssamlingen, og varierer fra 0,27 for en godstykkelse på 12 mm til 0,40 for godstykkelse større end 30 mm (tabel 1 og figur 1).

For andre overfladekvaliteter og korrosionsbeskyttede overflader henviser normen til en testprocedure for bestemmelse af friktionskoefficienten.

I følge den britiske aluminiumsnorm BS 8118 kan man anvende en friktionsfaktor på 0,33 for sandblæste overflader forudsat den totale godstykkelse af friktionssamlingen ikke er mindre end boltediameteren og spændingen i samlingselementerne ikke er større end 60% af materialets karakteristiske 0,2-spænding.

Hvis disse krav ikke er opfyldt skal friktionskoefficienten bestemmes ved forsøg.

Bæreevnen af friktionssamlinger i aluminium skal efter den danske norm for aluminiumkonstruktioner DS 419 bestemmes ved prøvning.

## Forsøgsemner

Udformningen af testemnerne er vist i figur 2.

Der er anvendt en hård aluminiumlegering 6082-T6 med en karakteristisk 0,2-spænding større end  $200 \text{ N/mm}^2$ , som foreskrevet i Eurocode 9.

En forspændt friktionssamling overfører trækbelastningen ved friktion mellem samlingselementernes kontaktflader. Bæreevnen af friktionssamlinger afhænger af friktionskoefficienten for kontaktfladerne og forspændingskraften på samlingen.

Styrkeberegningen af friktionssamlinger er gennemgået i figur 3.

Den foreskrevne forspændingskraft af boltene er 65% af boltematerialets karakteristiske brudstyrke i overensstemmelse med beregningsreglerne i Eurocode 9.

Det nødvendige tilspændingsmoment for at opnå den ønskede forspændingskraft afhænger af smøringen af gevind på bolte og møtrikker samt kontaktfladerne på underlagsskiverne.

I praksis vil der være en betydelig spredning på størrelsen af friktionsfaktoren for tilspændingsmomentet. Den anvendte friktionsfaktor på 0,138 er bestemt ved forsøg og kontrolleret under testserien med bolte strain-gauges.

## Forsøgsprocedure

Friktionsforsøgene er i væsentlig omfang udført i overensstemmelse med proceduren i Annex A, Test of Slip Factor, Eurocode 9 ENV 1999-1-1:1998.

Der er udført forsøg på to overfladekvaliteter, en ubehandlet valset overflade uden krav til overfladebehandling og en sandblæst overflade til ruhed  $Ra 12,5$  svarende til standardoverfladen i Eurocode 9.

For hver overfladekvalitet er friktionskoefficienten bestemt for varierende total gods-tykkelse af friktionssamlingen for eftervisning af tykkelseeffekten.

Forsøgsemnerne tilspændes til den foreskrevne forspændingskraft  $F_p$  og belastes derefter i en trækprøvemaskine.

Tilspændingen af boltene kontrolleres med bolte strain-gauge.

Der er ved indledende tilspændingsforsøg registreret en aflastning af forspændingskraften efter 24 timer på ca.  $100 \mu\text{Strain}$  svarende til  $20 \text{ N/mm}^2$ .

Hvis der foretages en efterspænding af boltene, er der efter endnu 24 timer kun målt en mindre aflastning på ca.  $10 \mu\text{Strain}$ .

Samlingerne tilspændes derfor 24 timer før trækforsøgene og efterspændes middelbart før belastningen.

Under trækforsøgene måles den relative forskydning i trækretningen af de to yderste plader (punkterne mrk. A) i forhold til den indvendige plade (punktet mrk. B) i figur 2.

For hvert trækforsøg registreres der to forsøgsresultater, et i hver ende af testemnet, og der testes på 5 forsøgsemner for hver godstykkelse af friktionssamlingerne.

Friktionskoefficienten for en given total godstykkelse kan således bestemmes på baggrund af 10 forsøgsresultater.

Den relative forskydning eller slippet mellem samlingselementerne måles med clip-gauge som vist i figur 4, og slippet registreres som funktion af den påførte trækraft.

Friktionskraften  $F_s$  er defineret som den trækraft, der giver et slip på 0,15 mm, og friktionskoefficienten kan herefter beregnes efter formelen fra figur 3:

$$\mu = F_s / (n \times m \times F_p)$$

$n = 1$ eller $2$	antal bolte
$m = 2$	antal kontaktflader

## Forsøgsresultater

For hver forsøgsserie beregnes middelværdien og standardafvigelsen samt den karakteristiske 5% fraktilværdi af friktionskoefficienten (tabel 2 og 3).

Forsøgsresultaterne er endvidere afbildet i figur 6 sammen med normværdierne for overfladekvaliteten N 10.

Som det ses, er der for den karakteristiske 5% fraktilværdi en tydelig tendens til stigende friktionskoefficient for tiltagende total godstykkelse af friktionssamlingerne.

Denne stigende tendens er i god overensstemmelse med angivelsen i Eurocode 9.

For forsøgsserien uden krav til overfladeruhed varierer den karakteristiske friktionskoefficient fra 0,14 til 0,21 for godstykkelsesintervallet 12mm til 30 mm.

Tilsvarende varierer friktionskoefficienten for overfladeruheden N10 fra 0,20 for godstykkelsen 14 mm til 0,31 for godstykkelsen 32 mm.

Det skal bemærkes, at alle forsøgsresultaterne ligger inden for den 5% fraktilværdien.

Forsøgsresultaterne for serien uden krav til overfladekvaliteten forekommer umiddelbart rimelige, hvis de sammenholdes med normværdien på 0,20 for stål ligeledes uden krav til overfladekvaliteten og uden hensyntagen til tykkelseeffekten.

De karakteristiske måleværdier for den sandblæste overfalde med ruheden Ra 12,5 er derimod markant mindre end de angivne friktionskoefficienterne i Eurocode 9 for samme overfladekvalitet.

Der er som ventet registreret en stor variation på forsøgsresultaterne, hvor standard-afvigelsen varierer mellem 15% og 29% af middelværdien, som vist grafisk i figur 8.

Figur 9 og 10 viser to forskellige tilfælde af de registrerede kraft og deformations-kurver. I det ene tilfælde har kurverne for de to ender af testemnet stort set samme hældning i starten af trækforsøget, og der er her kun en mindre forskel på de målte friktionskræfter ved slippet 0,15 mm.

I det andet tilfælde slipper kontaktfladerne i den ene ende af testemnet hurtigt, og belastningen bliver til sidst overført gennem forskydningspåvirkning af boltene inden den anden ende af testemnet slipper. Der er her målt en større forskel på friktions-kræfterne for de to ender.

Kraft og deformationkurverne for alle trækforsøgene er vist i de efterfølgende figurer.

## **Konklusion**

Friktionskoefficienterne for aluminiumsamlinger er bestemt ved forsøg i henhold til proceduren i Eurocode 9 for en valset overflade uden krav til overfladekvaliteten og for en sandblæst overflade til ruhed Ra 12,5 svarende til standardoverfladen i Eurocode 9.

Der er målt en tydelig tendens til stigende friktionskoefficienter for tiltagende total godstykkelse af friktionssamlingerne, som angivet i konstruktionsnormen.

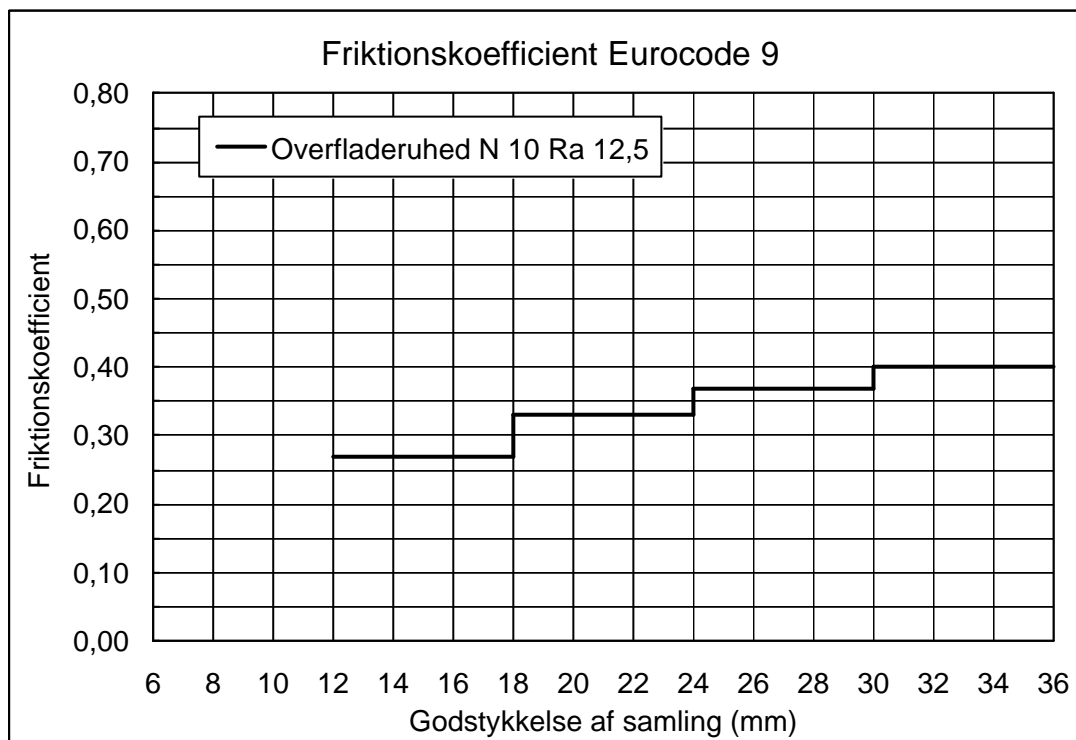
De målte friktionskoefficienter for valset overflade uden krav til overfladebehandling forekommer umiddelbart rimelige i forhold til forventningerne.

De karakteristiske måleværdier for den sandblæste overflade til ruhed Ra 12,5 er derimod markant mindre end friktionskoefficienterne i Eurocode 9 for samme overfladekvalitet.

Det har desværre ikke været muligt, at fremskaffe baggrundsdokumentation for de angivne friktionskoefficienter i Eurocode 9.

total tykkelse af samling $\Sigma t$ (mm)	friktionskoefficient $\mu$
$12 \leq \Sigma t < 18$	0,27
$18 \leq \Sigma t < 24$	0,33
$24 \leq \Sigma t < 30$	0,37
$30 \leq \Sigma t$	0,40

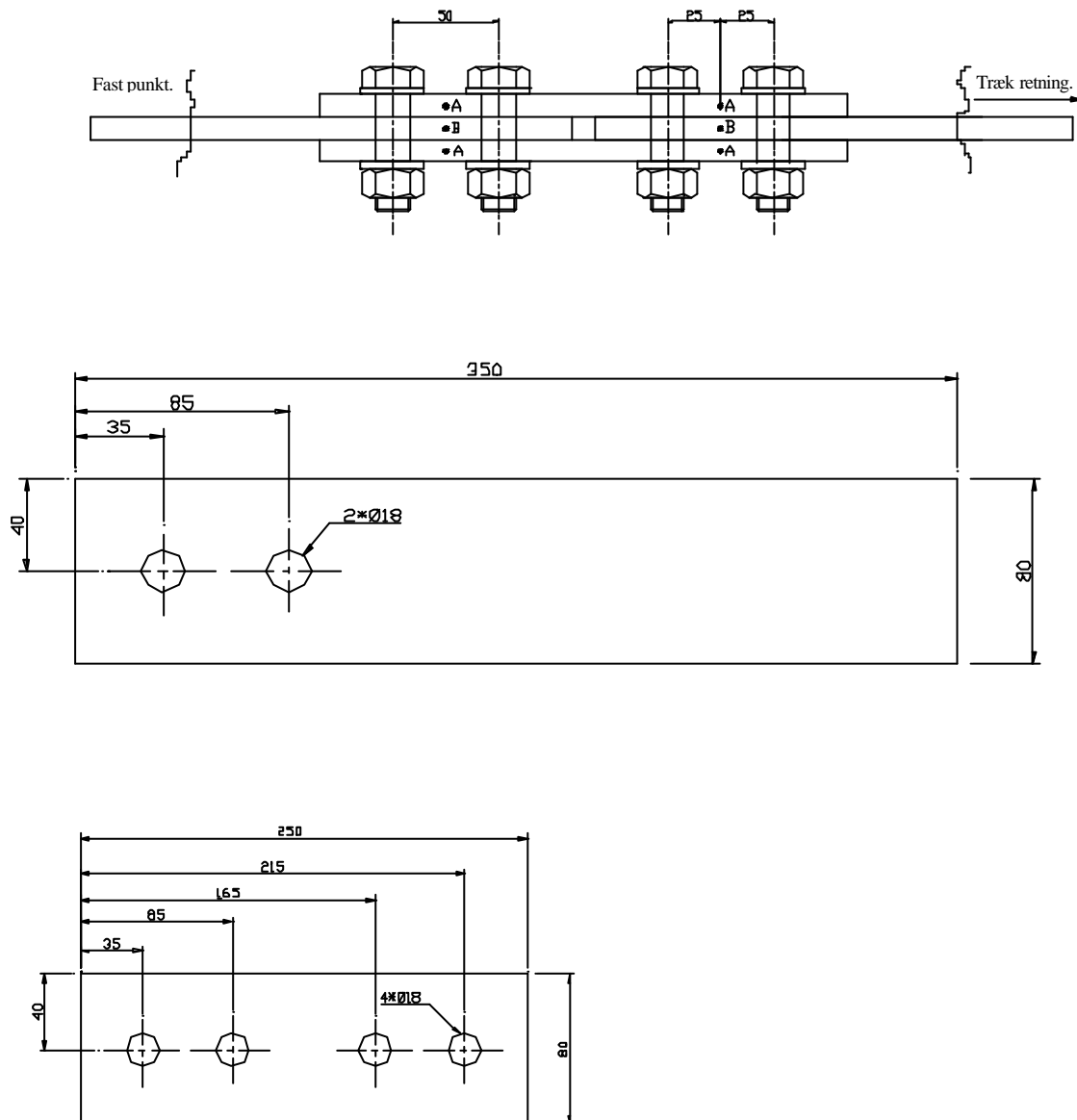
**Tabel 1**      **Friktionskoefficient for overfladekvalitet N10a efter Eurocode 9**



**Figure 1**      **Friktionskoefficient efter Eurocode 9**

## Forsøgsemner

Plademateriale	6082-T6	$f_{0,2} = 260 \text{ N/mm}^2$
Bolte, møtrikker og skiver	M 16 kvalitet 8.8 varmforzinket	$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$
Hulstørrelse	18 mm	



**Figur 2** Udformning af testemner

## Belastning af forsøgsemner

$$\text{Friktionskraft } F_s = \mu \times n \times m \times F_p$$

$\mu$  friktionskoefficient

$n$  antal bolte

$m$  antal kontaktflader

$F_p$  forspændingskraft

$$n = 1 \text{ eller } 2$$

$$m = 2$$

$$\text{Forspændingskraft } F_p = 0,65 \times f_{ub} \times A_s$$

$f_{ub}$  trækstyrke af boltemateriale

$A_s$  spændingsareal

$$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$A_s = 157 \text{ mm}^2$$

$$\underline{F_p = 81,64 \text{ kN}}$$

$$\text{Tilspændingsmoment } M_k = k \times d \times F_p$$

$k$  friktionsfaktor

$d$  boltediameter

$$k = 0,138$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$\underline{M_k = 180 \text{ Nm}}$$

$$\text{Kalibrering } F_p = \varepsilon \times E \times A_c$$

$\varepsilon$  kalibrerings tøjning

$E$  elasticitetsmodul

$A_c$  spændingsareal målebolt

$$\varepsilon = 2524 \mu\text{S}$$

$$E = 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$A_c = 154 \text{ mm}^2$$

$$\underline{F_p = 81,64 \text{ kN}}$$

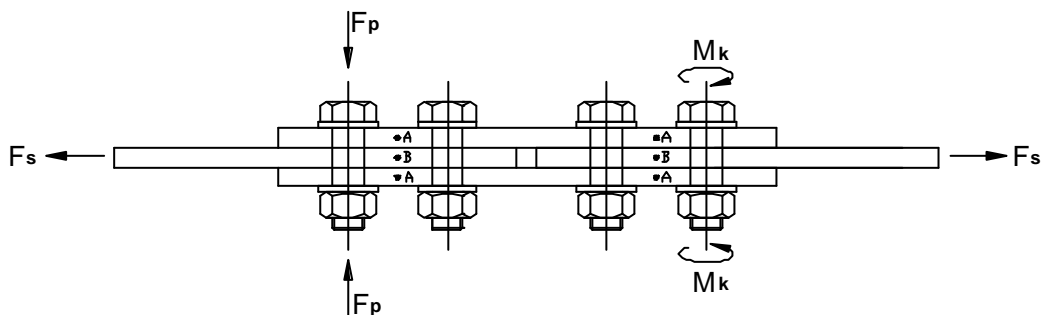
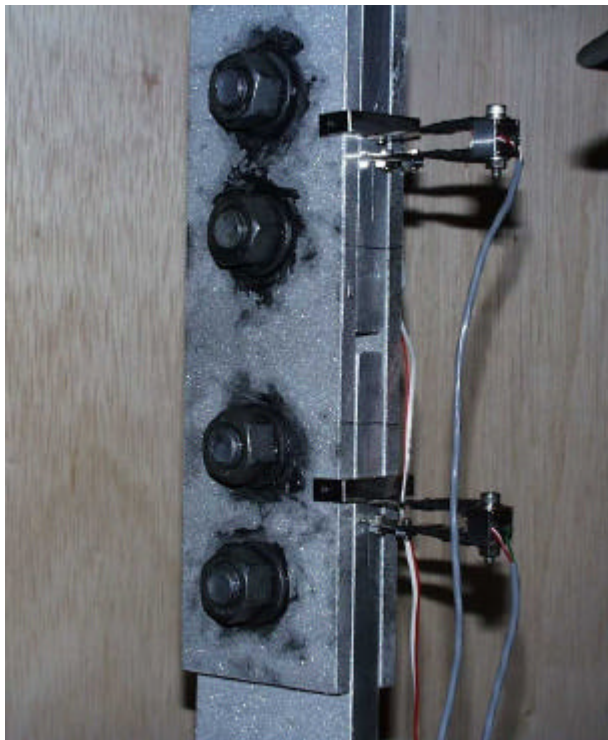
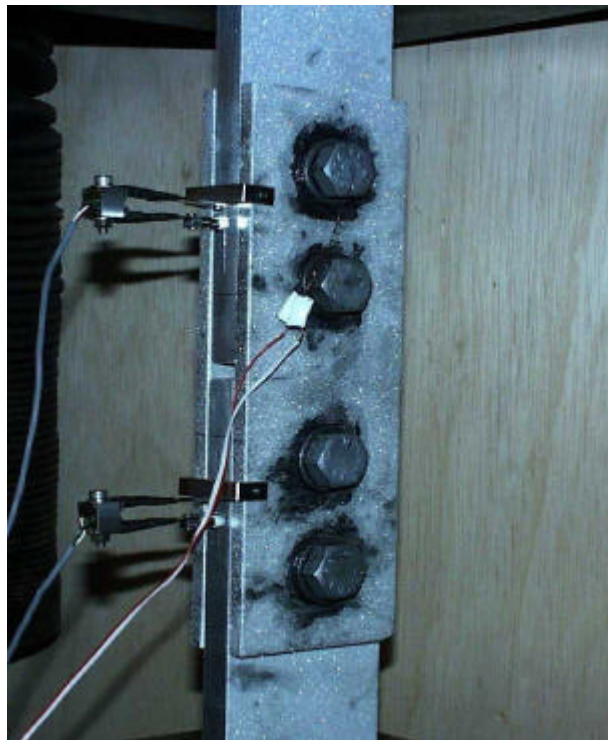


Figure 3 Belatning af testemner



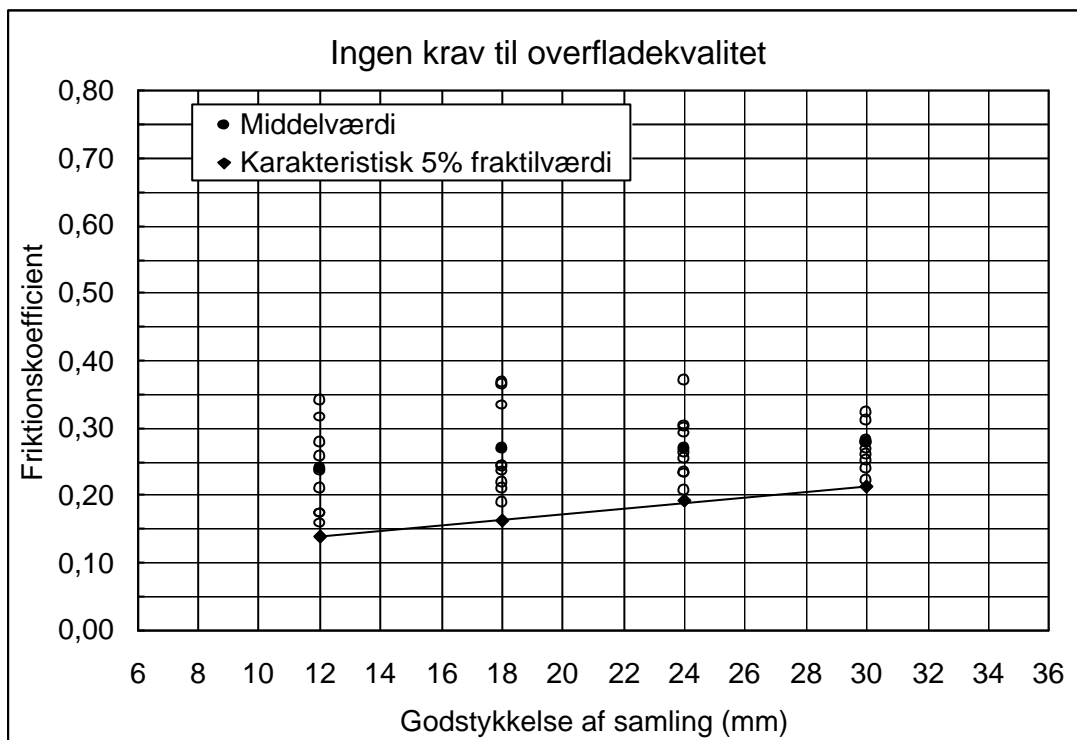
**Figure 4**      **Foto af prøveemner**

SASAK Projekt 5 Test af friktionskoefficient				
Overfladekvalitet : Ingen krav				
Godstykke : 12 mm (4+4+4)			Antal bolte : n = 1	
Test nr.	Fs1	Fs2	$\mu_1$	$\mu_2$
121 N0	25,77	51,55	0,158	0,316
122 N0	28,13	55,72	0,172	0,341
123 N0	38,77	41,89	0,237	0,257
124 N0	28,25	43,20	0,173	0,265
125 N0	34,15	45,31	0,209	0,277
Middelværdi				0,241
Standardafvigelse				0,062
Variationskoefficient				26%
Karakteristisk 5% fraktilværdi				0,138
Godstykke : 18 mm (6+6+6)			Antal bolte : n = 1	
Test nr.	Fs1	Fs2	$\mu_1$	$\mu_2$
181 N0	39,88	59,99	0,244	0,367
182 N0	34,36	39,49	0,210	0,242
183 N0	38,36	54,40	0,235	0,333
184 N0	30,82	45,31	0,189	0,277
185 N0	35,59	59,53	0,218	0,365
Middelværdi				0,268
Standardafvigelse				0,065
Variationskoefficient				24%
Karakteristisk 5% fraktilværdi				0,161
Godstykke : 24 Mm (8+8+8)			Antal bolte : n = 2	
Test nr.	Fs1	Fs2	$\mu_1$	$\mu_2$
241 N0	76,53	95,26	0,234	0,292
242 N0	82,88	67,86	0,254	0,208
243 N0	98,17	121,14	0,301	0,371
244 N0	98,98	79,63	0,303	0,244
245 N0	85,63	75,88	0,262	0,232
Middelværdi				0,270
Standardafvigelse				0,047
Variationskoefficient				18%
Karakteristisk 5% fraktilværdi				0,192
Godstykke : 30 mm (10+10+10)			Antal bolte : n = 2	
Test nr.	Fs1	Fs2	$\mu_1$	$\mu_2$
301 N0	90,74	105,55	0,278	0,323
302 N0	78,25	72,23	0,240	0,221
303 N0	85,26	101,85	0,261	0,312
304 N0	91,66	115,78	0,281	0,355
305 N0	82,39	87,48	0,252	0,268
Middelværdi				0,279
Standardafvigelse				0,041
Variationskoefficient				15%
Karakteristisk 5% fraktilværdi				0,212

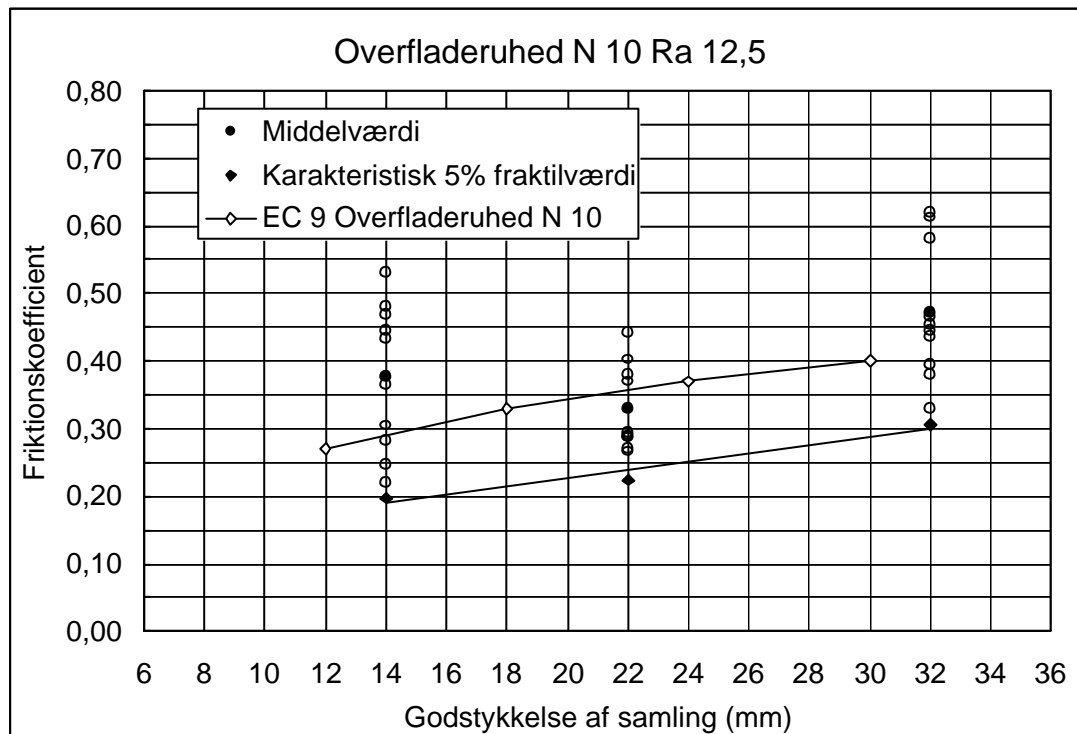
**Tabel 2 Forsøgsresultater Ingen krav til overfladekvalitet**

SASAK Projekt 5 Test af friktionskoefficient				
Overfladekvalitet : Ruhed N 10 Ra 12,5				
Godstykkelse : 4 + 6 + 4 = 14 mm			Antal bolte : n = 1	
Test nr.	F <sub>s1</sub>	F <sub>s2</sub>	μ <sub>1</sub>	μ <sub>2</sub>
141 N10	46,01	49,73	0,282	0,305
142 N10	59,54	72,82	0,365	0,446
143 N10	40,36	86,82	0,247	0,532
144 N10	35,71	70,82	0,219	0,434
145 N10	76,54	78,37	0,469	0,480
Middelværdi				0,378
Standardafvigelse				0,109
Variationskoefficient				29%
Karakteristisk 5% fraktilværdi				0,198
Godstykkelse : 6 + 10 + 6 = 22 mm			Antal bolte : n = 2	
Test nr.	F <sub>s1</sub>	F <sub>s2</sub>	μ <sub>1</sub>	μ <sub>2</sub>
221 N10	86,81	94,52	0,266	0,289
221 N10	93,40	124,31	0,286	0,381
221 N10	93,79	144,13	0,287	0,441
221 N10	96,00	131,22	0,294	0,402
221 N10	120,67	88,22	0,370	0,270
Middelværdi				0,329
Standardafvigelse				0,063
Variationskoefficient				19%
Karakteristisk 5% fraktilværdi				0,224
Godstykkelse : 8 + 16 + 8 = 32 mm			Antal bolte : n = 2	
Test nr.	F <sub>s1</sub>	F <sub>s2</sub>	μ <sub>1</sub>	μ <sub>2</sub>
321 N10	124,38	145,43	0,381	0,445
322 N10	189,80	202,26	0,581	0,619
323 N10	128,82	142,66	0,394	0,437
324 N10	151,80	200,11	0,465	0,613
325 N10	107,62	147,88	0,330	0,453
Middelværdi				0,472
Standardafvigelse				0,100
Variationskoefficient				21%
Karakteristisk 5% fraktilværdi				0,307

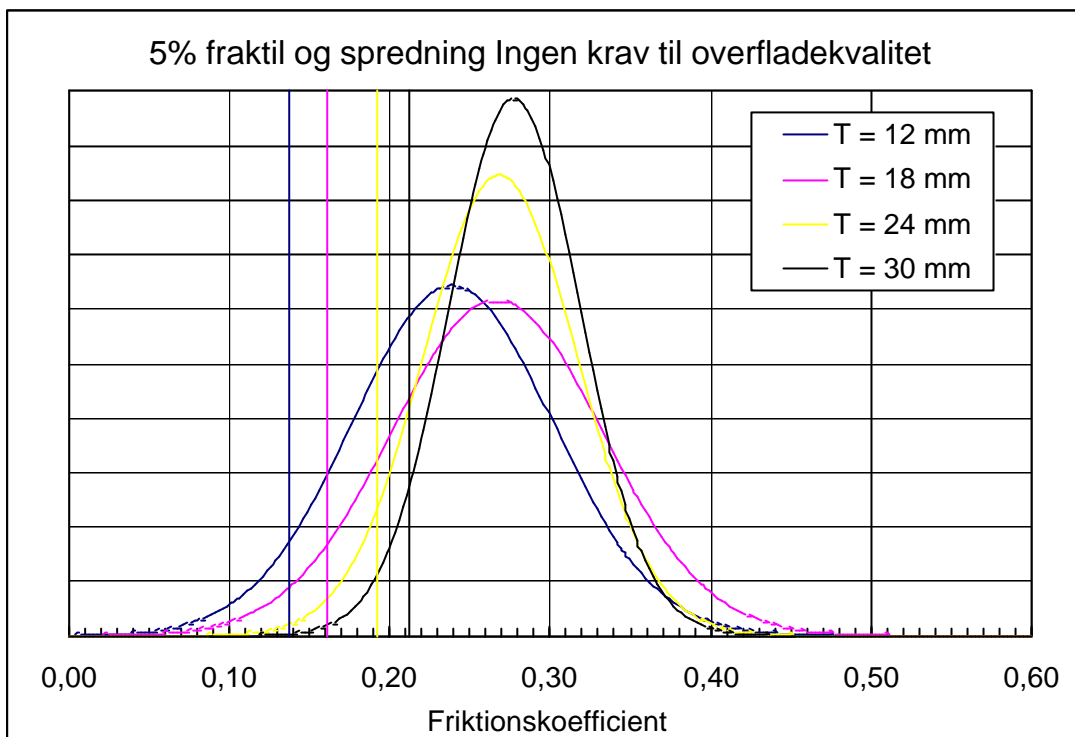
**Tabel 3      Forsøgsresultater Overfladeruhed N 10 Ra 12,5**



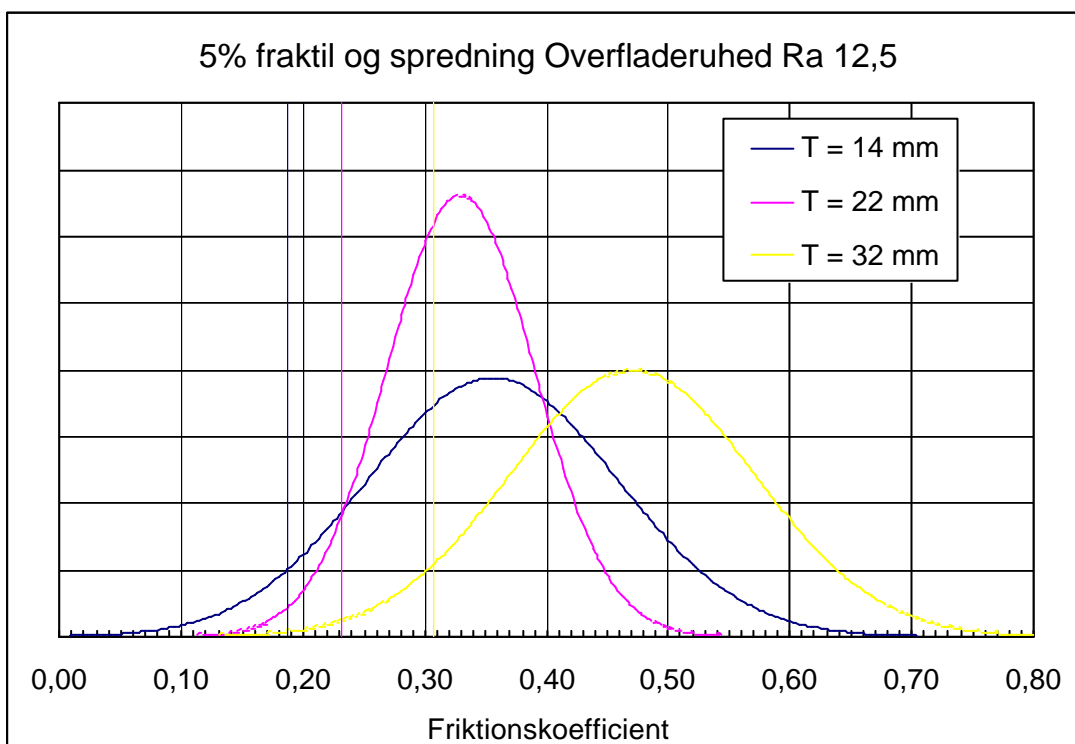
**Figur 5 Forsøgsresultater Ingen krav til overfladekvalitet**



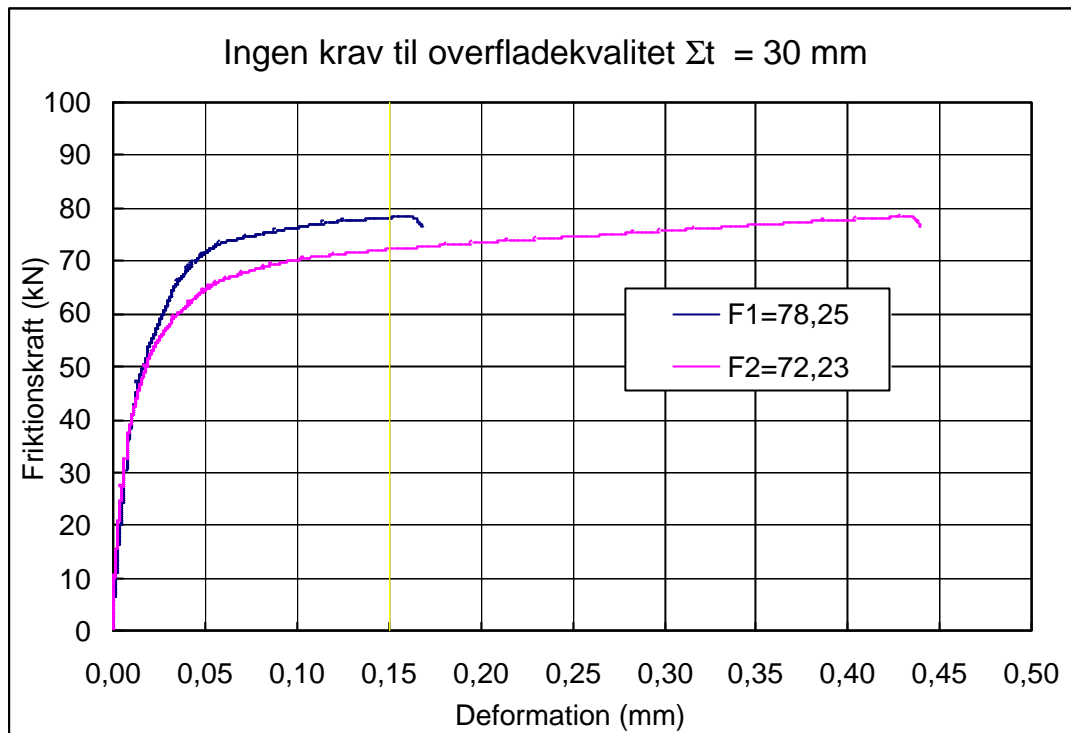
**Figur 6 Forsøgsresultater Overfladeruhed N 10 Ra 12,5**



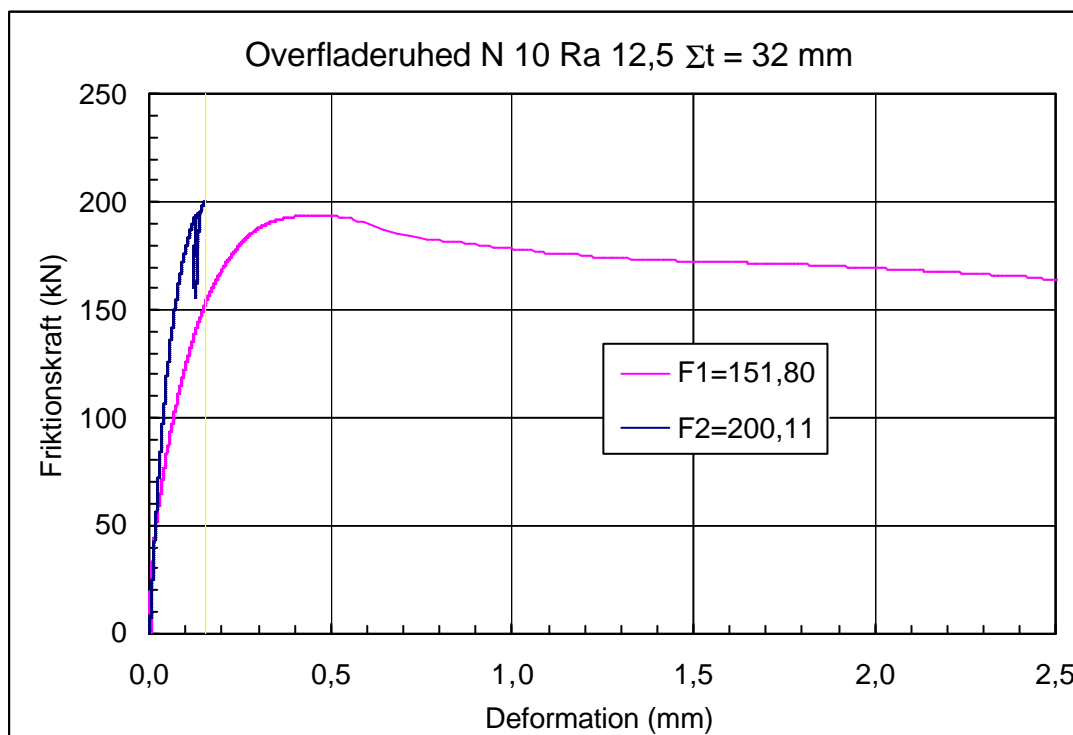
**Figur 7** Spredning Ingen krav til overfladekvalitet



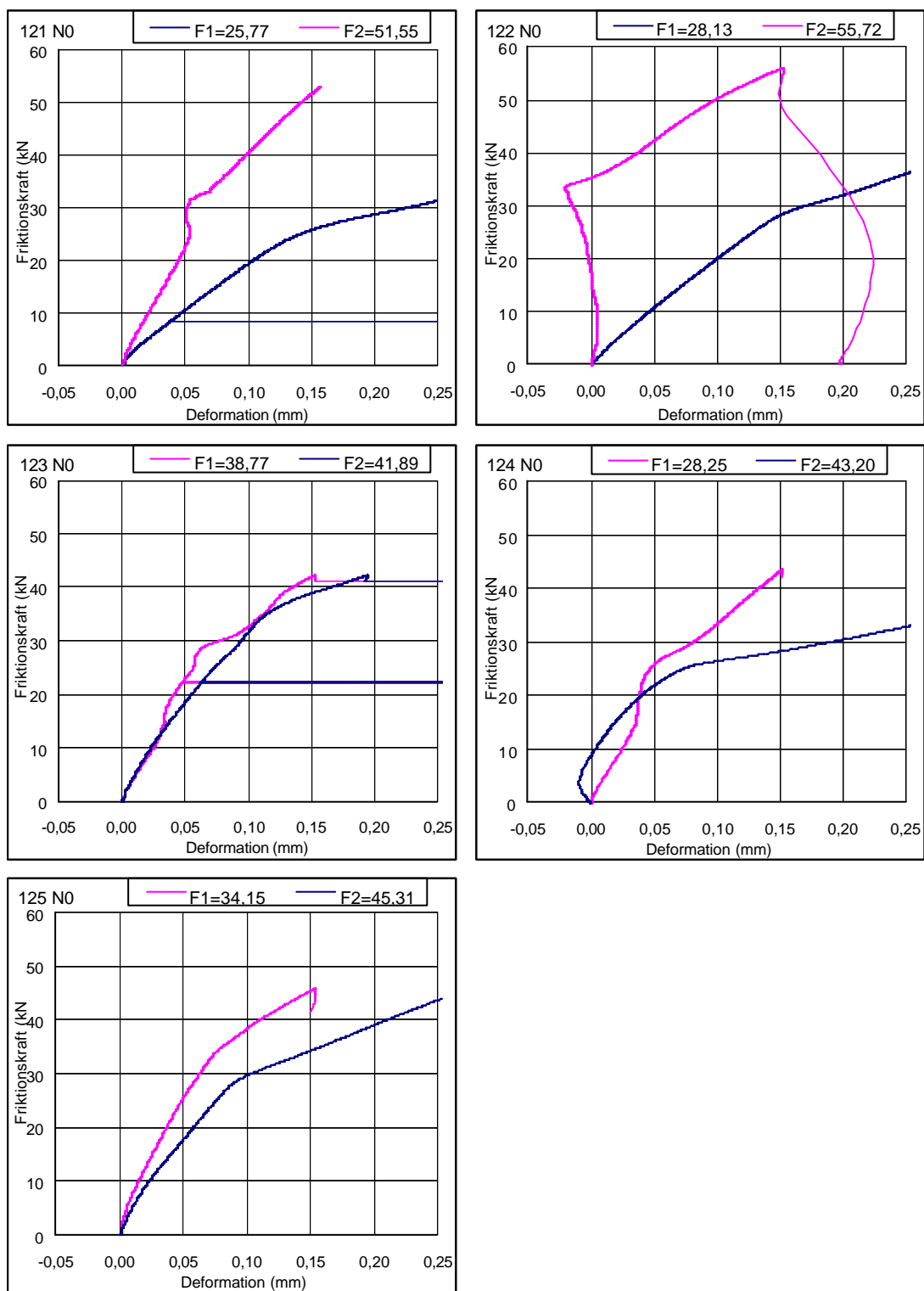
**Figur 8** Spredning Overfladeruheid N 10 Ra 12,5



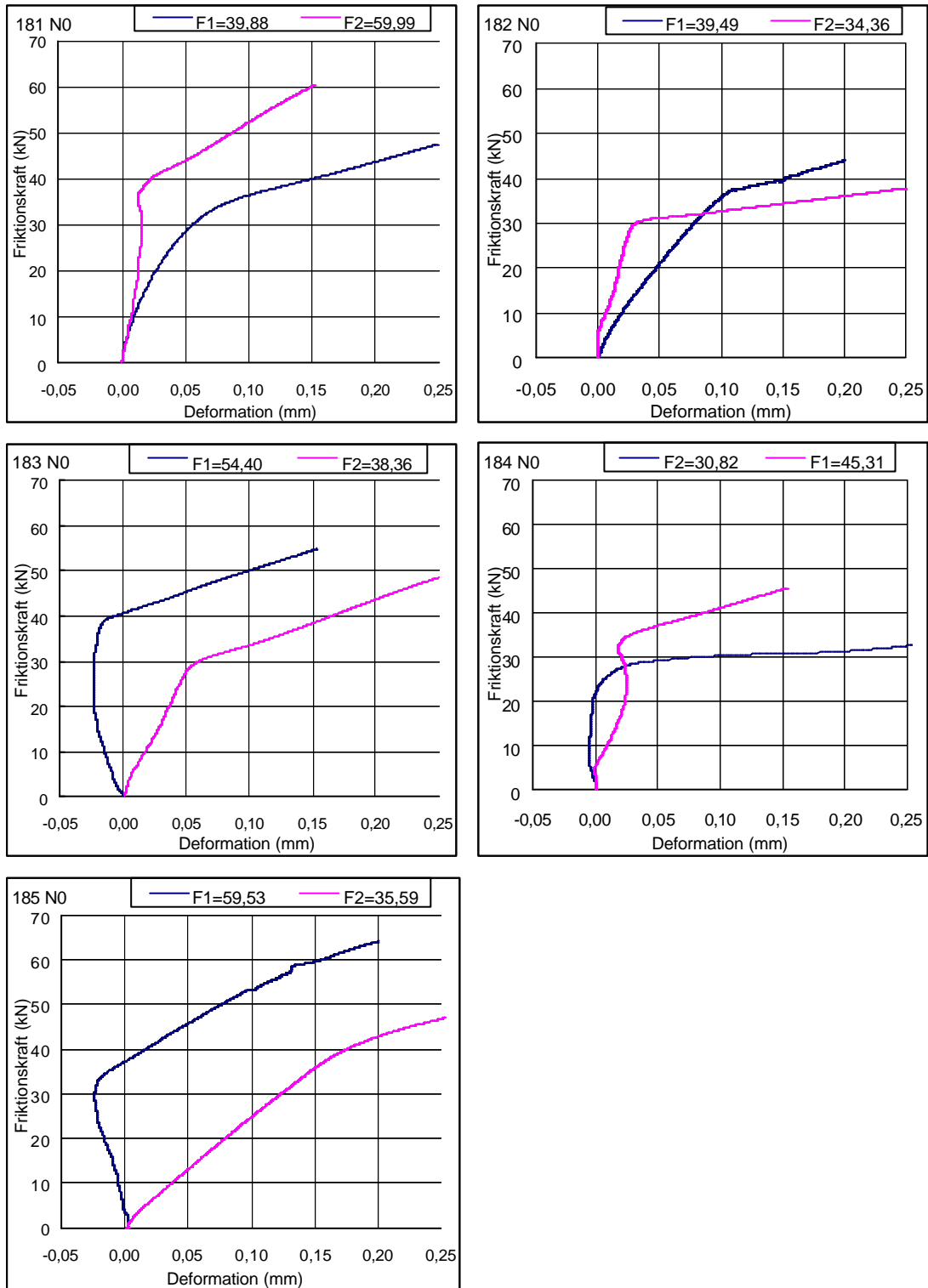
**Figur 9 Kraft og deformationskurve emne 302 N0**



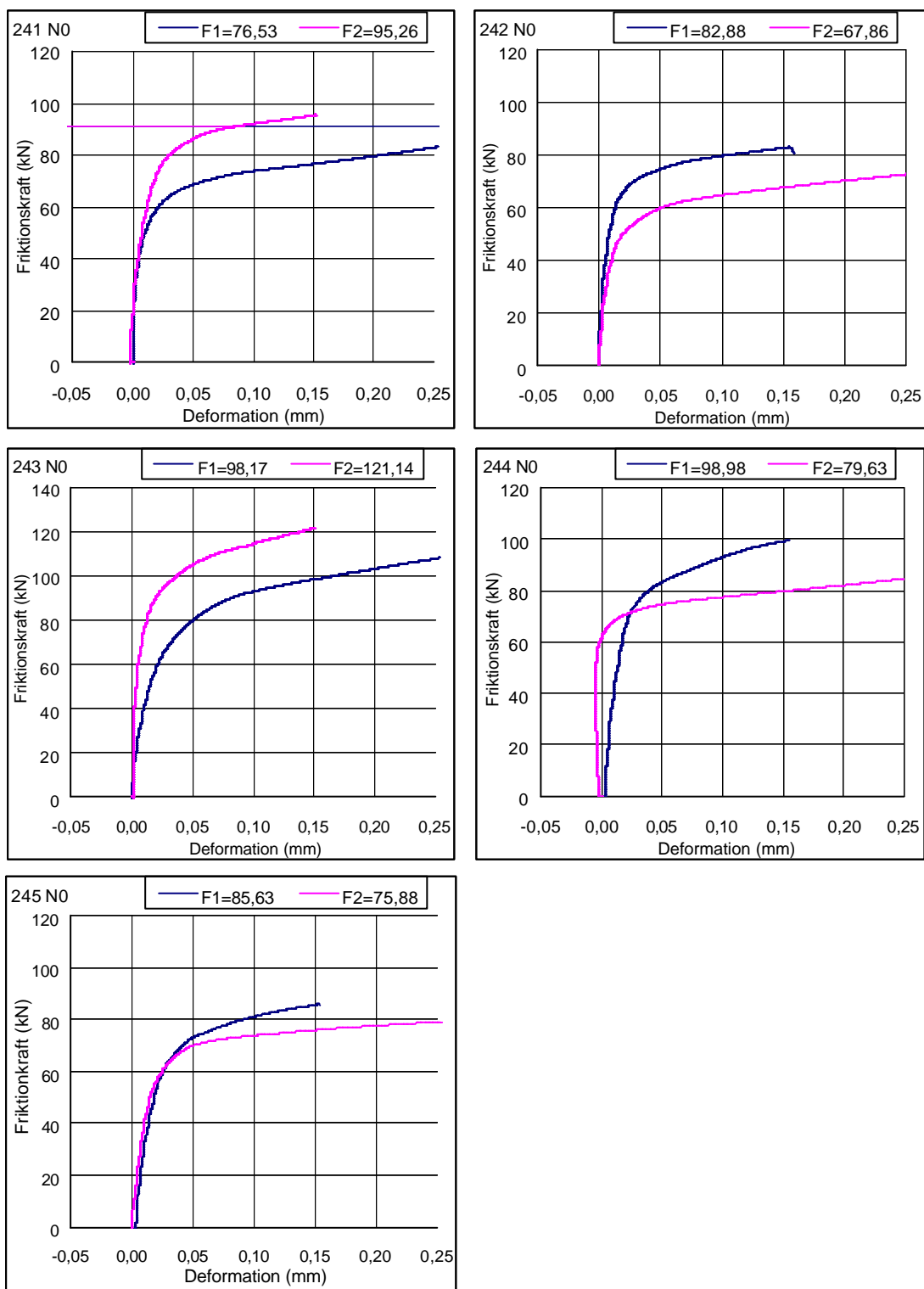
**Figur 10 Kraft og deformationsfigur emne 324 N10**



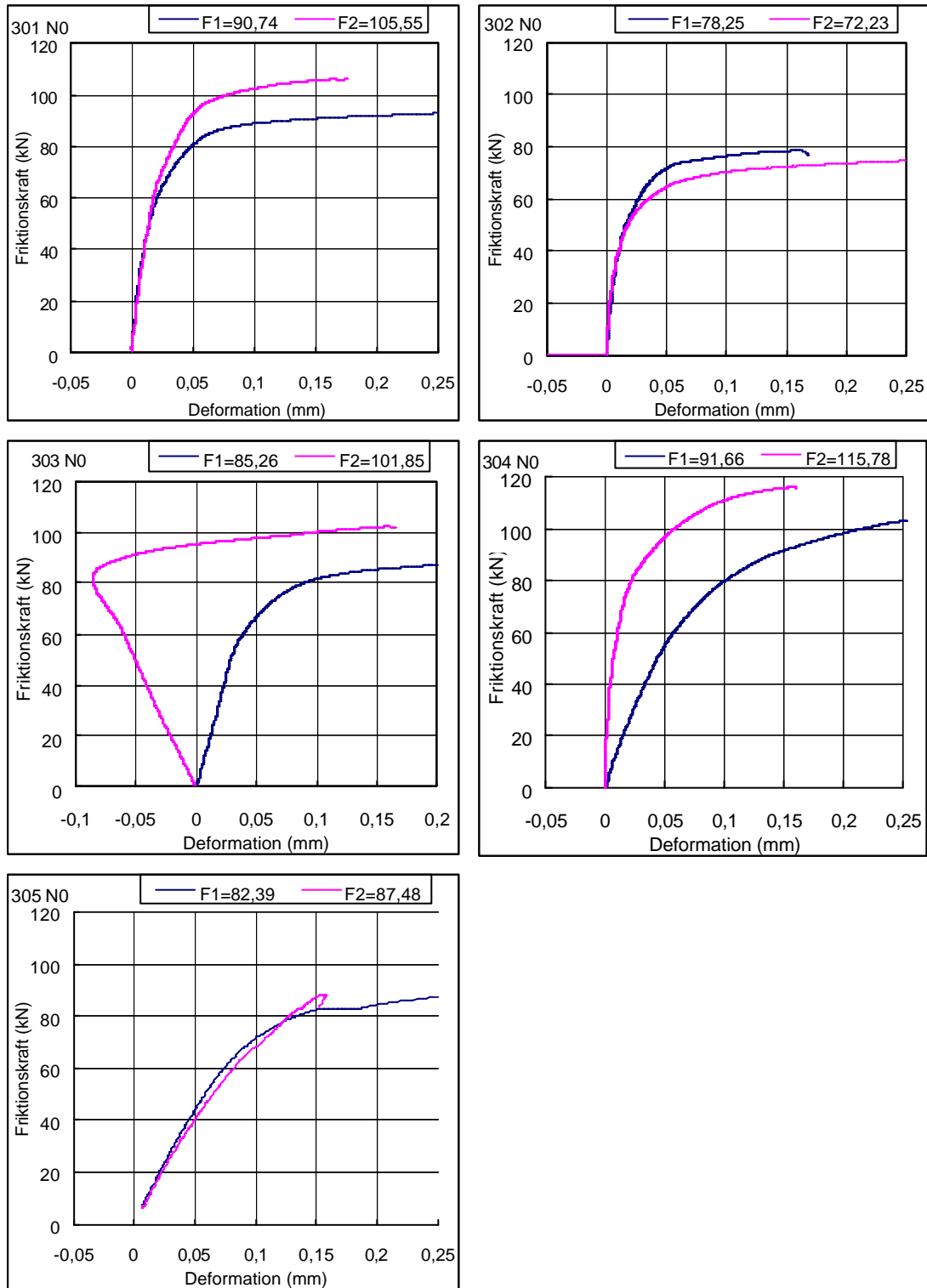
**Figur 11 Kraft og deformationskurver**



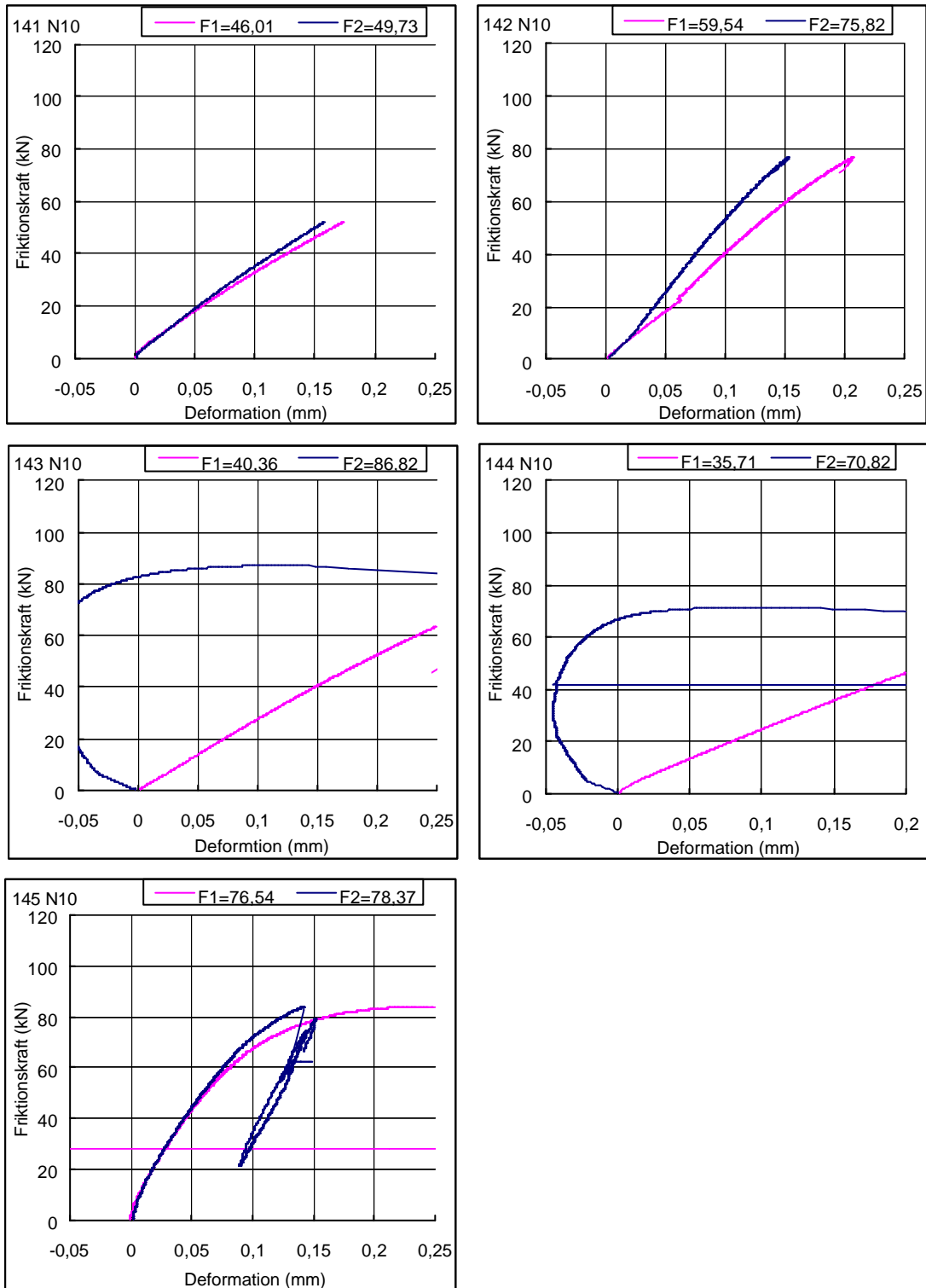
**Figur 12 Kraft og deformationskurver**



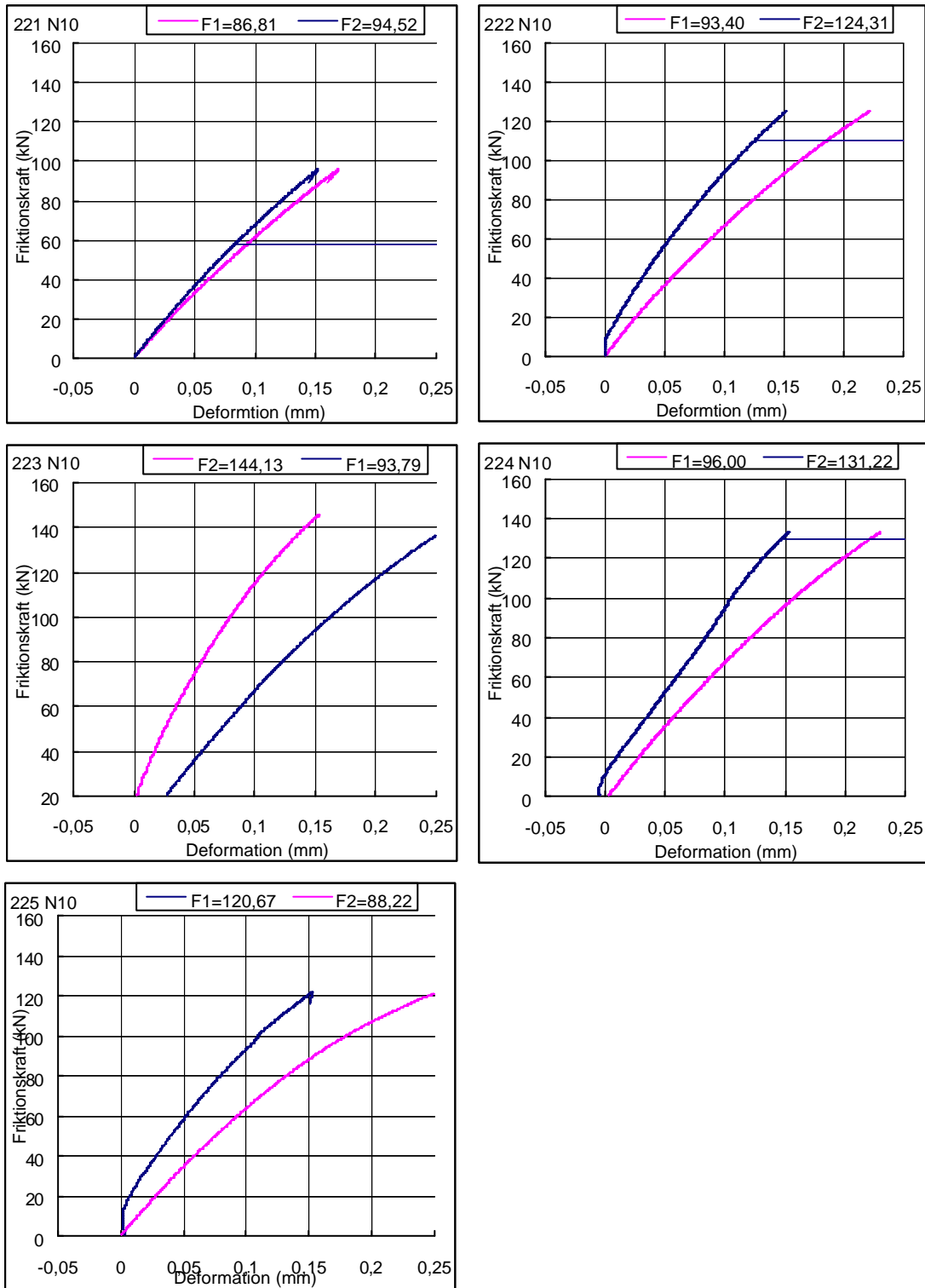
**Figur 13 Kraft og deformationskurver**



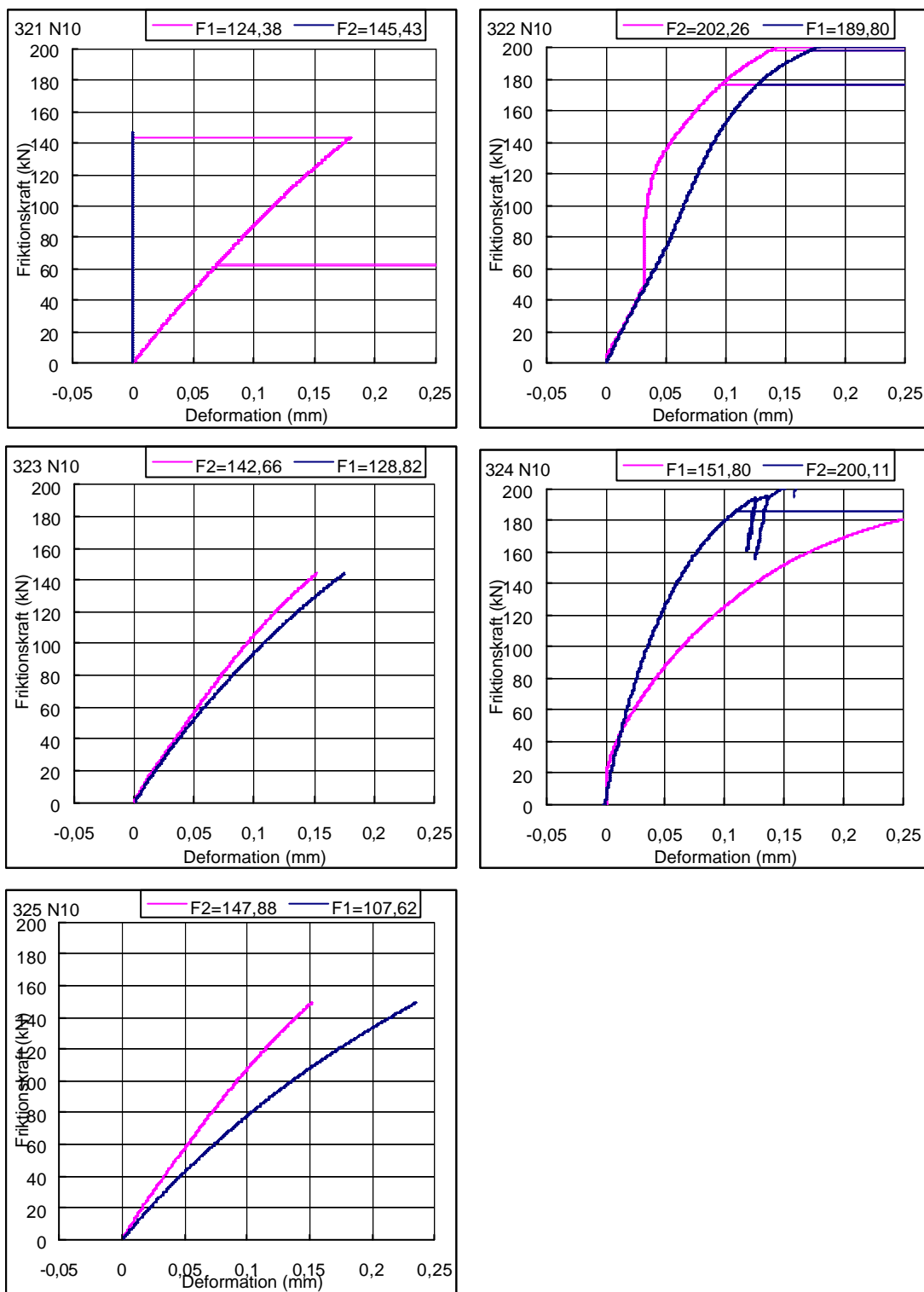
**Figur 14 Kraft og deformationskurver**



**Figur 15 Kraft og deformationskurver**



**Figur 16 Kraft og deformationsfigur**



**Figur 17 Kraft og deformationkurver**