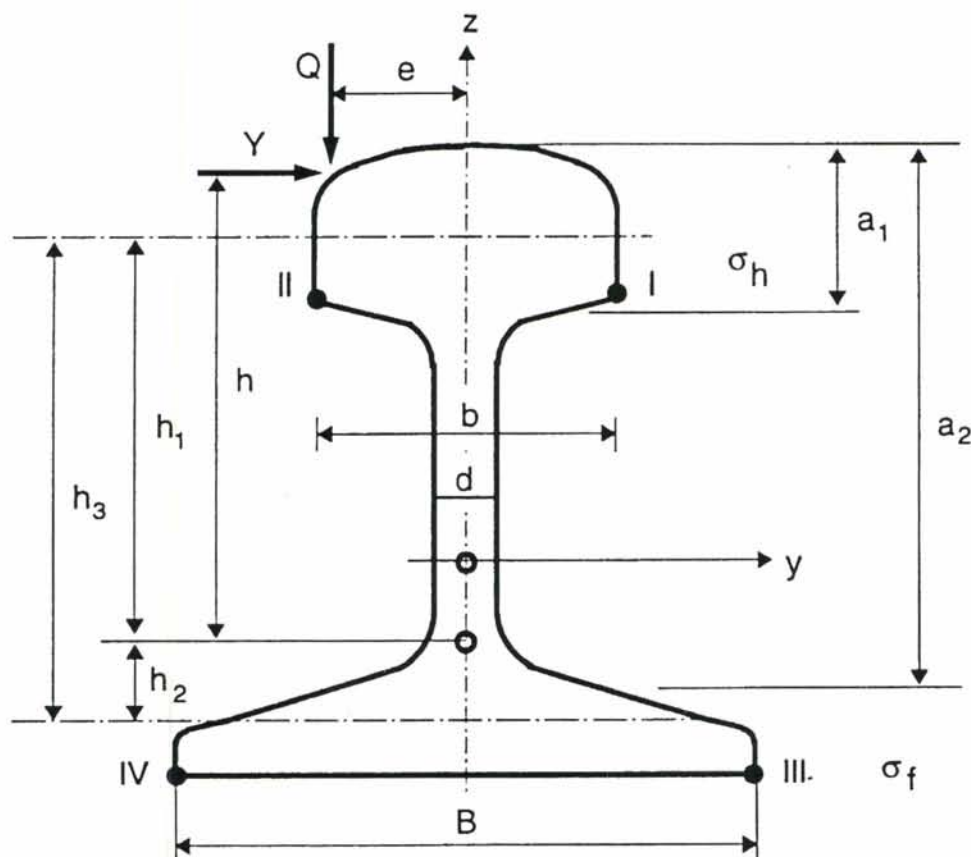


30 TONN på Ofotbanen



Rapport 4.7

DRIFT OG VEDLIKEHOLD

Overbygning
Beregning av skinnespenninger



INNHOLDSFORTEGNELSE

INNHOLDSFORTEGNELSE	I
SYMBOLLISTE	V
SAMMENDRAG.....	VII
1. INNLEDNING.....	1
2. BEREGNING MED BALLASTSIFFER C = 0,30 N/mm ³	2
2.1 Vertikale krefter Q	2
2.1.1 Aksellast P = 25 tonn, S49.....	2
2.1.1.1 Kvasistatisk tilstand	2
2.1.1.2 Dynamisk tilstand	4
2.1.1.3 Skinnespenninger.....	5
2.1.2 Aksellast P = 30 tonn, S49.....	7
2.1.2.1 Kvasistatisk tilstand	7
2.1.2.2 Dynamisk tilstand	8
2.1.2.3 Skinnespenninger.....	9
2.1.3 Aksellast P = 25 tonn, S54.....	10
2.1.3.1 Kvasistatisk tilstand	10
2.1.3.2 Dynamisk tilstand	11
2.1.3.3 Skinnespenninger.....	12
2.1.4 Aksellast P = 30 tonn, S54.....	13
2.1.4.1 Kvasistatisk tilstand	13
2.1.4.2 Dynamisk tilstand	15
2.1.4.3 Skinnespenninger.....	15
2.1.5 Aksellast P = 25 tonn, UIC60	16
2.1.5.1 Kvasistatisk tilstand	16
2.1.5.2 Dynamisk tilstand	18
2.1.5.3 Skinnespenninger.....	19
2.1.6 Aksellast P = 30 tonn, UIC60	20
2.1.6.1 Kvasistatisk tilstand	20
2.1.6.2 Dynamisk tilstand	22
2.1.6.3 Skinnespenninger.....	23
2.1.7 Sammenstilling av resultater for beregninger med C = 0,30 N/mm ³	24
2.1.8 Kontroll av kvasistatiske- og dynamiske spenninger	25
2.2 Kombinasjon av horisontale og vertikale krefter Y/Q-forhold.....	27
2.2.1 Horisontale/laterale krefter Y	27
2.2.1.1 Kombinasjon av Y- og Q-krefter.....	27
2.2.2 Skinnespenninger for S49, P = 25 tonn	29
2.2.3 Skinnespenninger for S49, P = 30 tonn	30
2.2.4 Skinnespenninger for S54, P = 25 tonn	31
2.2.5 Skinnespenninger for S54, P = 30 tonn	32
2.2.6 Skinnespenninger for UIC60, P = 25 tonn.....	33
2.2.7 Skinnespenninger for UIC60, P = 30 tonn.....	34
2.2.8 Vurdering av de dynamiske kreftene fra en boggi.....	35
2.3 Sammendrag for beregninger med C = 0,30 N/mm ³	37

2.4 Konklusjon for ballastsiffer $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$	40
3. BEREGNING MED BALLASTSIFFER $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$	42
3.1 Vertikale krefter Q	42
3.1.1 Aksellast $P = 25$ tonn, S49	42
3.1.1.1 Kvasistatisk tilstand	42
3.1.1.2 Dynamisk tilstand	44
3.1.1.3 Skinnespenninger	45
3.1.2 Aksellast $P = 30$ tonn, S49	45
3.1.2.1 Kvasistatisk tilstand	45
3.1.2.2 Dynamisk tilstand	47
3.1.2.3 Skinnespenninger	48
3.1.3 Aksellast $P = 25$ tonn, S54	49
3.1.3.1 Kvasistatisk tilstand	49
3.1.3.2 Dynamisk tilstand	51
3.1.3.3 Skinnespenninger	52
3.1.4 Aksellast $P = 30$ tonn, S54	53
3.1.4.1 Kvasistatisk tilstand	53
3.1.4.2 Dynamisk tilstand	55
3.1.4.3 Skinnespenninger	55
3.1.5 Aksellast $P = 25$ tonn, UIC60	56
3.1.5.1 Kvasistatisk tilstand	56
3.1.5.2 Dynamisk tilstand	59
3.1.5.3 Skinnespenninger	59
3.1.6 Aksellast $P = 30$ tonn, UIC60	60
3.1.6.1 Kvasistatisk tilstand	60
3.1.6.2 Dynamisk tilstand	63
3.1.6.3 Skinnespenninger	63
3.1.7 Sammenstilling av resultater for beregninger med $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$	65
3.1.8 Kontroll av kvasistatiske- og dynamiske spenninger	65
3.2 Kombinasjon av horisontale og vertikale krefter Y/Q	67
3.2.1 Horisontale/laterale krefter Y	67
3.2.2 Skinnespenninger for S49, $P = 25$ tonn	67
3.2.3 Skinnespenninger for S49, $P = 30$ tonn	68
3.2.4 Skinnespenninger for S54, $P = 25$ tonn	69
3.2.5 Skinnespenninger for S54, $P = 30$ tonn	70
3.2.6 Skinnespenninger for UIC60, $P = 25$ tonn	70
3.2.7 Skinnespenninger for UIC60, $P = 30$ tonn	71
3.2.8 Vurdering av de dynamiske kreftene fra boggikonstruksjon	72
3.3 Sammendrag for beregninger med $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$	74
3.4 Konklusjon for ballastsiffer $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$	77
4. BEREGNING MED BALLASTSIFFER $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$	79
4.1 Vertikale krefter Q	79
4.1.1 Aksellast $P = 25$ tonn, S49	79
4.1.1.1 Kvasistatisk tilstand	79
4.1.1.2 Dynamisk tilstand	81
4.1.1.3 Skinnespenninger	82
4.1.2 Aksellast $P = 30$ tonn, S49	83
4.1.2.1 Kvasistatisk tilstand	83
4.1.2.2 Dynamisk tilstand	85

4.1.2.3	Skinnespenninger.....	85
4.1.3	Aksellast P = 25 tonn, S54.....	86
4.1.3.1	Kvasistatisk tilstand	86
4.1.3.2	Dynamisk tilstand	88
4.1.3.3	Skinnespenninger.....	89
4.1.4	Aksellast P = 30 tonn, S54.....	90
4.1.4.1	Kvasistatisk tilstand	90
4.1.4.2	Dynamisk tilstand	92
4.1.4.3	Skinnespenninger.....	93
4.1.5	Aksellast P = 25 tonn, UIC60	94
4.1.5.1	Kvasistatisk tilstand	94
4.1.5.2	Dynamisk tilstand	96
4.1.5.3	Skinnespenninger.....	97
4.1.6	Aksellast P = 30 tonn, UIC60	98
4.1.6.1	Kvasistatisk tilstand	98
4.1.6.2	Dynamisk tilstand	100
4.1.6.3	Skinnespenninger.....	100
4.1.7	Sammenstilling av resultater for beregninger med $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$	102
4.1.8	Kontroll av kvasistatiske- og dynamiske spenninger	102
4.2	Kombinasjon av horisontale og vertikale krefter Y/Q.....	104
4.2.1	Horisontale/laterale krefter Y	104
4.2.2	Skinnespenninger for S49, P = 25 tonn	104
4.2.3	Skinnespenninger for S49, P = 30 tonn	105
4.2.4	Skinnespenninger for S54, P = 25 tonn	106
4.2.5	Skinnespenninger for S54, P = 30 tonn	107
4.2.6	Skinnespenninger for UIC60, P = 25 tonn.....	108
4.2.7	Skinnespenninger for UIC60, P = 30 tonn.....	109
4.2.8	Vurdering av de dynamiske kreftene fra boggikonstruksjon	110
4.3	Sammendrag for beregninger med $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$	111
4.4	Konklusjon for ballastsiffer $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$	116
5.	SKJÆRSPENNINGER SOM KAN FØRE TIL UTVALSING AV SKINNEHODET	117
5.1	Generelt.....	117
5.2	Skjærspenninger i skinnehodet ved 25 tonn aksellast.....	117
5.3	Skjærspenninger i skinnehodet ved 30 tonn aksellast.....	118
5.4	Sammendrag for skjærspenninger som kan føre til utvalsing	118
5.5	Konklusjon for skjærspenninger som kan føre til utvalsing av skinnehodet..	119
6.	KONTROLL AV MINSTE TILLATTE HJULDIAMETER.....	120
7.	KONKLUSJON.....	122
8.	APPENDIKSLISTE	123

SYMBOLLISTE

Symbol	Navn	Enhet
$(Y/Q)_{DYN}$	Forholdstall mellom de dynamiske horisontal- og vertikalkreftene	
a	Svilleavstand	mm
a_0	Ukompensert sideaksellerasjon	m/s^2
b	Langsvillebredde	mm
B	Skinnefotens bredde	mm
b	Skinnehodets bredde	mm
b'	Svillens bredde	mm
$C_{RES} = C$	Ballastsiffer	N/mm^3
d	Ekstremfaktor	
d	Hjuldiameter	mm
e	Eksentrisiteten til vertikalkraften (avstand fra senter skinne)	cm
E	Elastisitetsmodul	N/mm^2
F	Belastet svilleflate	mm^2
h	Høyden fra skjærpunktet til horisontalkraften	cm
I	Manglende overhøyde	mm
I_{x-x}	Treghetsmoment om X-aksen	mm^4
k	Sporstandard	
l	Svillens lengde	mm
L	Grunnverdi, karakteristisk lengde	mm
m	Ubelastet lengde på svillen	mm
M_B	Dynamisk bøyemoment	Ncm
M_{DYN}	Dynamisk bøyemoment inkl. statisk og kvasistatisk moment	Nmm
M_{KS}	Kvasistatisk bøyemoment	Nmm
$M_{KS\ TOTAL}$	Total kvasistatisk bøyemoment på grunn av flere punktlaster	Nmm
M_W	Dynamisk torsjonsmoment	N/mm^2
p	Ballasttrykket under svillen, statisk	N/mm^2
p_{DYN}	Dynamisk ballasttrykk inkl. statisk og kvasistatisk ballasttrykk	N/mm^2
p_{KS}	Kvasistatisk ballasttrykk	N/mm^2
P	Aksellast	tonn
P_A	Styringskraften	kN
Q_0	Nominell vertikallast (aksellast), statisk	kN
Q_{DYN}	Dynamisk vertikallast inkl. statisk og kvasistatisk last	kN
Q_{KS}	Kvasistatisk vertikallast	kN
Q_{KS30}	Kvasistatisk last for 30 tonns aksellast	kN
q_m	Opptredende spenninger på skinnehodet	N/mm^2
r	Hjulets radius	mm
$r_{TILLATT}$	Tillatt hjulradius på godsvognene	mm
R	Kurvens radius	mm
s	Standardavvik	
S_{DYN}	Dynamisk støttepunktkraft inkl. statisk og kvasistatisk støttepunktkraft	kN
S_{KS}	Kvasistatisk støttepunktkraft	kN
t	Statistisk sikkerhet	
v	Hastighetsfaktor	
v	Sikkerhetsfaktor	
V	Fart, hastighet	km/h
W_{FOT}	Motstandsmoment om X-aksen	mm^3
W_{x-x}	Motstandsmoment om X-aksen	mm^3
x	Avstanden mellom punktlastene	mm
y	Nedbøyning av skinnen	mm

Y_{DYN}	Dynamisk nedbøyning inkl. statisk og kvasistatisk nedbøyning	mm
Y_{KS}	Kvasistatisk nedbøyning	mm
$Y_{KS\ TOTAL}$	Total kvasistatisk nedbøyning på grunn av flere punktlaster	mm
Y_{DYN}	Dynamisk horisontalkraft inkl. kvasistatisk horisontalkraft	kN
$Y_{f\øring}$	Føringskraften	kN
Y_{KS}	Kvasistatisk horisontalkraft	kN
$Y_{sentr.}$	Sentrifugalkraften	kN
Y_{vind}	Vindkraft	kN

Greske symboler og vanlige som starter med et gresk tegn

Symbol	Navn	Enhet
α	Sporgeometrisk avhengig faktor for kurveradier < 500 m og eventuelt om skinnen er smurt	
α	Varmeutvidelseskoeffisientet til stålet	1/°C
ΔQ	Kvasistatisk tillegg (% av nominell vertikallast)	kN
ΔQ_{DYN}	Dynamisk lasttillegg	kN
ΔQ_{DYN25}	Dynamisk lasttillegg for 25 tonns aksellast	kN
$\Delta\sigma_{1H}$	Skinnespenninger på hodet som skyldes vertikalkraften	N/mm ²
$\Delta\sigma_{2F}$	Skinnespenninger på foten som skyldes vridning	N/mm ²
$\Delta\sigma_{2H}$	Skinnespenninger på hodet som skyldes vridning	N/mm ²
$\Delta\sigma_{3F}$	Skinnespenninger på foten som skyldes horisontalkraften	N/mm ²
$\Delta\sigma_{3H}$	Skinnespenninger på hodet som skyldes horisontalkraften	N/mm ²
ΔT	Temperaturendring	°C
λ_{0F}	Innflytelsen av vertikal bøyning i underkant ytterst på skinnefot	cm ⁻³
λ_{0H}	Innflytelsen av vertikal bøyning i underkant skinnehode	cm ⁻³
λ_{1H}	Innflytelsen av spenningsspredningen gjennom skinnehodet	cm ⁻²
λ_{2F}	Innflytelsen av torsjonsmomentet i underkant ytterst på skinnefot	cm ⁻³
λ_{2H}	Innflytelsen av torsjonsmomentet i underkant skinnehode	cm ⁻³
λ_{3F}	Innflytelsen av horisontal bøyning i underkant ytterst på skinnefot	cm ⁻²
λ_{3H}	Innflytelsen av horisontal bøyning i underkant skinnehode	cm ⁻²
σ_b	Skinnespenning som skyldes horisontal bøyning i kurver	N/mm ²
σ_{BF}	Skinnespenning i skinnefot som skyldes bøyemomentet	N/mm ²
σ_{BH}	Skinnespenning i skinnehode som skyldes bøyemomentet	N/mm ²
σ_{BRUDD}	Skinnsens bruddspenning	N/mm ²
$\sigma_{EGEN\ FOT}$	Egenspenning for senter skinnefot	N/mm ²
$\sigma_{EGEN\ FOT}$	Egenspenning på hjørnet av skinnefoten	N/mm ²
$\sigma_{EGEN\ HODE}$	Egenspenning i hjørnet av skinnehodet	N/mm ²
$\sigma_{F\ III,IV}$	Skinnespenninger i underkant og ytterst skinnefot	N/mm ²
σ_{FLYT}	Skinnsens flytspenning	N/mm ²
σ_{FOT}	Skinnespenninger på ekstremverdisiden	N/mm ²
$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN}$	Dynamisk skinnespenninger i underkant senter skinnefot inklusiv statisk og kvasistatisk skinnespenning	N/mm ²
$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS}$	Kvasistatisk skinnespenninger i underkant senter skinnefot	N/mm ²
$\sigma_{H\ I,II}$	Skinnespenninger i underkant skinnehode	N/mm ²
σ_{HODE}	Skinnespenninger på ekstremverdisiden	N/mm ²
σ_{SAMLET}	Totale skinnespenninger i underkant senter skinnefot	N/mm ²
$\sigma_{SAMLET\ FOT}$	Ekstremspenning inkl. egen- og temperaturspenning på enten inner-	

	eller yttersiden av skinnefoten	N/mm ²
$\sigma_{\text{SAMLET HODE}}$	Ekstremspenning inkl. egen- og temperaturspenning på enten inner- eller yttersiden av skinnehodet	N/mm ²
σ_{TEMP}	Temperaturspenning	N/mm ²
σ_{TILLATT}	Tillatt spenning på skinnehodet	N/mm ²
τ_{max}	Opptredende skjærspenning	N/mm ²
τ_{TILLATT}	Tillatt skjærspenning	N/mm ²

SAMMENDRAG

I forbindelse med at LKAB ønsker at den statiske aksellasten på Ofotbanen skal økes fra 25 til 30 tonn, har det vært nødvendig å vurdere innvirkning av dette både på overbygningen og underbygningen. Skinnene er en svært sentral del av overbygningen, og ved hjelp av Zimmermanns metode er det foretatt skinnespenningsberegninger for skinneprofil S49, S54 og UIC60 med aksellaster på 25 og 30 tonn. S49 benyttes i de fleste sporveksler, mens S54 ligger i hovedtogspor. UIC60 er vurdert med tanke på fremtiden.

Ballastsifferet C som er en verdi for elastisiteten i opplagringen av skinnene og er avhengig av undergrunnen, pukkkvaliteten og mellomlegget, har stor innvirkning på skinnespenningsene. Beregningene er gjennomført for tre C-verdier; $0,30 \text{ N/mm}^3$ (svært hardt underlag - fjellskjæringer, steinfyllinger), $0,20 \text{ N/mm}^3$ (middels hardt underlag - morenemasser) og $0,15 \text{ N/mm}^3$ (mykt underlag - siltholdig jord og lignende).

Spenninger både på grunn av rene vertikale krefter (Q) og en kombinasjon av horisontale og vertikale krefter (Y/Q) er beregnet. Det er laget tabeller for spenningsene i skinnene ved forskjellige Y/Q-forhold. Opptredende skinnespenninger tas ut fra tabellene når aktuelle Y/Q-forhold blir funnet ved hjelp av sporkraftmålinger.

Beregning av skjærspenninger som kan føre til utvalsing i skinnehodet og kontroll av hjuldiameteren med tanke på bruddspenninger i kontaktpunktet hjul/skinne, er også utført.

Beregningsresultatene viser at ut fra faren for skinnebrudd/utmatting kan skinneprofil S54 (1200-kvalitet) beholdes i hovedspor ved en aksellastøkning til 30 tonn. Justerte erfaringstall fra Tyskland som tar hensyn til levetid og økonomi, gir også samme resultat. Imidlertid vil den tekniske levetiden forventes å bli redusert med ca. 10% på grunn av økte skjærspenninger som fører til utvalsing i skinnehodet.

Sporvekslene med skinneprofil S49 (900-kvalitet) må derimot byttes ut med et større skinneprofil og høyere stålqualität, fordi der er fare for utmattingsbrudd ved $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$ og 30 tonn. De justerte, tyske erfaringsverdiene viser også at sporvekslene må skiftes. Dessuten forventes levetiden å bli redusert med 10%, fordi skjærspenningsene som gir utvalsing i skinnehodet, vokser tilsvarende med økt aksellast.

De teoretiske beregningene viser at bruddspenningen allerede nå overskrides i skinnehodet til S49 med dagens hjuldiameter på 980 mm, 25 tonns aksellast og usmurte skinner. For S54 (1200-kvalitet) og UIC60 (1200-kvalitet) er det ingen problemer med hjuldiameteren på vognene verken ved aksellaster på 25 eller 30 tonn.

1. INNLEDNING

LKAB ønsker at den statiske aksellasten på Ofotbanen skal kunne heves fra 25 til 30 tonn. Forutsetningene er at det skal konstrueres en ny malmvogn, så hverken linjelasten eller de dynamiske skinnespenningsene øker. Boggiekonstruksjonen vil ha mye å si for skinnespenningsene, men i og med at den nye boggien ikke er bestemt enda, må beregningene av skinnespenninger bygge på antagelser når det gjelder horisontale krefter (Y-krefter) og de dynamiske kreftene. De vertikale kreftene (Q-krefter) deles inn i statiske-, kvasistatiske- og dynamiske krefter, mens Y-kreftene inndeles i kvasistatiske- og dynamiske krefter.

Zimmermanns metode (kvasistatisk tilstand - KS) vil bli benyttet i beregningene. Metoden har følgende forutsetninger:

- Utgangspunktet er kvasistatisk hjullast Q_{KS} .
- Kvasistatisk tilstand innebærer at det rullende materialet er stillestående.
- Q_{KS} angriper sentrisk i skinnehodet.
- Longitudinelle (langsgående) krefter tas det ikke hensyn til.
- Laterale (horisontale) krefter tas det normalt ikke hensyn til.
- Ballasttykkelsen fra underkant sville til formasjonsplanet 300 mm.
- Belastningstrykk (kraftfordeling) mot svillens underside som for nyjustert spor.

2. BEREGNING MED BALLASTSIFFER $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$

2.1 VERTIKALE KREFTER Q

2.1.1 Aksellast $P = 25 \text{ tonn, S49}$

2.1.1.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 25 \text{ tonn} \sim 250 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 250/2 \text{ kN} = \underline{125 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

Det kvasistatiske tillegget inkluderer forandring av hjultrykket på grunn av overhøyde i sporet, eksentrisk belastning på grunn av usymmetrisk lagret gods, endring av hjultrykket i vindskjevt spor og vindlast.

På Ofotbanen kjører de med tilnærmet likevektshastighet det vil si ukompensert sideaksellerasjon $a_0 = 0 \text{ m/s}^2$ og manglende overhøyde $I = 0 \text{ mm}$, men banen er kurverik med små kurveradier.

Avvik fra likevektshastigheten, endring av hjultrykket i vindskjevt spor og vindkrefter vil kunne forekomme. Det kvasistatiske tillegget settes derfor lik:

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 125 \text{ kN} = 18,75 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{ks} = Q_0 + \Delta Q = 125 \text{ kN} + 18,75 \text{ kN} = \underline{143,75 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

Bøksviller, $l = 2.500 \text{ mm}$, $b' = 250 \text{ mm}$, lengde av ubelastet midtdel på svillen $m = 500 \text{ mm}$, svilleavstand $a = 520 \text{ mm}$.

$$\text{Belastet svilleflate: } F = (l - m)b' = (2.500 - 500)250 \text{ mm}^2 = 500.000 \text{ mm}^2$$

$$\text{Langsvillebredde: } b = \frac{F}{2a} = \frac{500.000}{2 \cdot 520} \text{ mm} = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

Ballastsifferet C er avhengig av undergrunnens egenskaper, pukkkvalitet og mellomleggets elastisitet.

På Ofotbanen er det tresviller og 2 mm gummi mellomlegg. Mellomlegget vil i dette tilfellet ikke få noen innvirkning på det resulterende ballastsifferet.

Ballastprofilen fyller ikke kravet på 300 mm fra underkant sville til formasjonsplanet på en del strekninger. Underbygningen er varierende og for en stor del preget av fjell eller fyllinger av sprengstein. Ballastsifferet settes derfor i første omgang til:

$$C_{RES} = \frac{p}{y} \text{ N/mm}^3 = \underline{0,30 \text{ N/mm}^3}$$

p = ballasttrykket under svillen
y = nedbøyning av skinnen

Grunnverdi L:

Skinneprofil S49, elastisitetsmodul $E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, treghetsmoment om X-aksen $I_{xx} = 1.819 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 18.190.000}{481 \cdot 0,30}} \text{ mm} = \underline{570 \text{ mm}}$$

Hvis akselavstanden i boggien eller avstanden mellom de to nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner er større enn $2,36 L$ (avstanden fra hjulkraftens angrepspunkt til bøyelinjens nullpunkt), vil ikke skinnespenningen influeres av flere enn én hjulaksel.

Akselavstandene i gammel og ny boggi er henholdsvis 1700 mm og 1780 mm. Imidlertid vil avstanden mellom de nærmeste akslene i to på hverandre følgende vogner, være 1500 mm for gamle og 1420 mm for nye vogner. Avstanden mellom hjulkraftens angrepspunkt og bøyelinjens nullpunkt må derfor kontrolleres mot disse avstandene for å undersøke om flere aksler vil innvirke på nedbøyningen og momentet i skinnen.

$$2,36L = 2,36 \times 570 \text{ mm} = 1.345 \text{ mm} < 1.420 \text{ mm}$$

Det betyr at skinnespenningen under en hjullast ikke påvirkes av naboakslar (største deformasjoner og spenninger i skinnen opptrer direkte under en enkelt aksel i boggien).

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

$$y_{KS} = \frac{Q_{KS}}{2bCL} \text{ mm} = \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,30 \cdot 570} \text{ mm} = \underline{0,87 \text{ mm}}$$

Moment i skinnen:

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS}L}{4} \text{ Nm} = \frac{143.750 \cdot 570}{4} \text{ Nmm} = \underline{20,484 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyepeningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S49, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 240,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{KS}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{20.484.000}{240.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{85,4 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

Ballasttrykket er trykket mellom underkant sville og ballasten. Som en «tommelfingerregel» bør ikke ballasttrykket overstige $0,30 \text{ N/mm}^2$ for betongsviller i dynamisk tilstand. For tresviller vil kravet til ballasttrykket ligge noe høyere.

$$p_{KS} = C_{\text{RES}} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,30 \times 0,87 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,261 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktkraften under svillen:

Støttepunktkraften er den kraften som forårsaker belastningen på svillene. Denne kraften benyttes til dimensjoneringen av betongsvillen (maks. 150 kN i dynamisk tilstand).

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,261 \text{ N} = \underline{65,3 \text{ kN}}$$

2.1.1.2 Dynamisk tilstand

Hastighetsavhengig faktor v:

$$v = 1,0 + \frac{V - 60}{140} \geq 1,0$$

Dimensjonerende hastighet $V = 50 \text{ km/h}$. For hastigheter $V < 60 \text{ km/h}$ settes

$$\underline{v = 1,0.}$$

Faktor for sporstandard k:

k = 0,1 for meget god sporstandard
k = 0,2 for middels god sporstandard
k = 0,3 for dårlig sporstandard
For Ofotbanen settes k = 0,2

Standardavvik:

$$s = k v = 0,2 \times 1,0 = \underline{0,2}$$

Statistisk sikkerhet:

Statistisk sikkerhet er sikkerhet mot overskridelser av teoretiske grenser for maksimale krefter.

t = 3 (statistisk sikkerhet lik (99,70 + 0,15) % = 99,85 %)
t = 2 (statistisk sikkerhet lik (95,00 + 2,50) % = 97,50 %)
t = 1 (statistisk sikkerhet lik (68,30 + 15,85) % = 84,15 %)

Velger statistisk sikkerhet t = 3.

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med d = 1,6.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 143,75 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{230,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 0,87 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{1,39 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 20,484 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{32,774 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = \sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} \times d = 85,4 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{136,6 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,261 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,418 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 65,3 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{104,5 \text{ kN}}$$

2.1.1.3 SkinnespenningerSkinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{BRUDD} = 880 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} = 85,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = 136,6 \text{ N/mm}^2$$

Egenspenning for senter skinnefot er: $\sigma_{\text{EGEN FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

Temperaturspenning: $\sigma_{\text{TEMP}} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{\text{SAMLET}} = \sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} + \sigma_{\text{EGEN FOT}} + \sigma_{\text{TEMP}} = 136,6 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 386,0 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{FLYT}} = 580 \text{ N/mm}^2.$$

$\sigma_{\text{FLYT}} = 580 \text{ N/mm}^2$ som er tatt fra Smiths anskuelsesdiagram.

Utmatting:

Smiths anskuelsesbilde angir den tillatte størrelsen på trafikkspenningene for å unngå utmatting i skinnene. Det har ikke vært mulig å få frem Smiths diagram for 1200-skinne utenom å stipulere ved hjelp av et diagram for 900-kvalitet.

Ved bruk av Smiths diagram for skinnekvalitet på 900, skulle det ikke være problemer med utmatting i senter skinnefot på grunn av trafikkbelastningen. Den tillatte trafikkspenningen avleses til 260 N/mm².

Smiths anskuelsesbilde er fremkommet under idealiserte tilstander i laboratorium. Det må imidlertid tas hensyn til ytre forhold i sporet. Korrusjon kan være en faktor som har sterk innflytelse. På Ofotbanen bør den tillatte trafikkspenningen divideres med en faktor på 1,4 for å ta hensyn til ytre forhold i sporet.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 136,6 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 900-kvalitet er det ikke noen fare for utmatting ved 25 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,30 N/mm³, S49, 25 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,418 > 0,30 N/mm²).
- Støttepunktraften er mindre enn kravet for betongsville (104,5 < 150 kN).

2.1.2 Aksellast P = 30 tonn, S49

2.1.2.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 30 \text{ tonn} \sim 300 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 300/2 \text{ kN} = \underline{150 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 150 \text{ kN} = 22,50 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 150 \text{ kN} + 22,50 \text{ kN} = \underline{172,50 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,30 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

For beskrivelse av grunnverdi L henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$L = \underline{570 \text{ mm}}$$

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

$$y_{KS} = \frac{Q_{KS}}{2bCL} \text{ mm} = \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,30 \cdot 570} \text{ mm} = \underline{1,05 \text{ mm}}$$

Moment i skinnen:

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS} L}{4} \text{ Nm} = \frac{172.500 \cdot 570}{4} \text{ Nmm} = \underline{24.581 \times 10^3 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S49, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 240,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{KS}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{24.581.000}{240.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{102,4 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{\text{RES}} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,30 \times 1,05 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,315 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktkraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktkraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,315 \text{ N} = \underline{78,8 \text{ kN}}$$

2.1.2.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned} v &= 1,0 \\ k &= 0,2 \\ s &= 0,2 \\ t &= 3 \end{aligned}$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{\text{DYN}} = Q_{\text{KS}} \times d = 172,50 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{276,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 1,05 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{1,68 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 24,581 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{39,330 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = \sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} \times d = 102,4 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{163,8 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,315 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,504 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 78,8 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{126,1 \text{ kN}}$$

2.1.2.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{BRUDD} = 880 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} = 102,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = 163,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{EGEN \text{ FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{TEMP} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{SAMLET} = \sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} + \sigma_{EGEN \text{ FOT}} + \sigma_{TEMP} = 163,8 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 413,8 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{FLYT} = 580 \text{ N/mm}^2.$$

$\sigma_{FLYT} = 580 \text{ N/mm}^2$ som er tatt fra Smiths anskuelsesdiagram.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 163,8 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 900-kvalitet er det ikke noen fare for utmatting ved 30 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,30 N/mm³, S49, 30 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,504 > 0,30 N/mm²).

- Støttepunkt kraften er mindre enn kravet for betongville (126,1 < 150 kN).

2.1.3 Aksellast P = 25 tonn, S54

2.1.3.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 25 \text{ tonn} \sim 250 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 250/2 \text{ kN} = \underline{125 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 125 \text{ kN} = 18,75 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 125 \text{ kN} + 18,75 \text{ kN} = \underline{143,75 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,30 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

Skinneprofil S54, elastisitetsmodul $E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, treghetsmoment om X-aksen $I_{xx} = 2.073 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 20.730.000}{481 \cdot 0,30}} \text{ mm} = \underline{589 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn $2,36 L$, for at ikke skinnespenningen skal påvirkes av flere aksler.

$$2,36L = 2,36 \times 589 \text{ mm} = 1.390 \text{ mm} < 1.420 \text{ mm}$$

Det betyr at skinnebelastningen kun influeres av én aksel (største deformasjon og spenning i skinnen opptrer direkte under en enkelt aksel i boggien).

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

$$y_{KS} = \frac{Q_{KS}}{2bCL} \text{ mm} = \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,30 \cdot 589} \text{ mm} = \underline{0,85 \text{ mm}}$$

Moment i skinnen:

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS}L}{4} \text{ Nm} = \frac{143.750 \cdot 589}{4} \text{ Nmm} = \underline{21,167 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S54, motstandsmoment om X-aksen for foten $W_{x-x} = 276,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{KS}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{21.167.000}{276.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{76,7 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{\text{RES}} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,30 \times 0,85 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,255 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktkraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktkraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,255 \text{ N} = \underline{63,8 \text{ kN}}$$

2.1.3.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v , sporstandard k , standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned}v &= 1,0 \\k &= 0,2 \\s &= 0,2 \\t &= 3\end{aligned}$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 143,75 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{230,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 0,85 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{1,36 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 21,167 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{33,867 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = \sigma_{FOT\ U.K.\ KS} \times d = 76,7 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{122,7 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,255 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,408 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 63,8 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{102,1 \text{ kN}}$$

2.1.3.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{BRUDD} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = 76,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = 122,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{EGEN\ FOT} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{TEMP} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{SAMLET} = \sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} + \sigma_{EGEN\ FOT} + \sigma_{TEMP} = 122,7 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 372,7 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2.$$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2/1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 122,7 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 25 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,30 N/mm³, S54, 25 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,408 > 0,30 N/mm²).
- Støttestrukturkraften er mindre enn kravet for betongsville (102,1 kN < 150 kN).

2.1.4 Aksellast P = 30 tonn, S54

2.1.4.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 30 \text{ tonn} \sim 300 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 300/2 \text{ kN} = \underline{150 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 150 \text{ kN} = 22,50 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{ks} = Q_0 + \Delta Q = 150 \text{ kN} + 22,50 \text{ kN} = \underline{172,50 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

Langsvillebredde: $b = 481 \text{ mm}$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$C_{\text{RES}} = 0,30 \text{ N/mm}^3$$

Grunnverdi L:

For beskrivelse av grunnverdi L henvises det til kap. 2.1.3.1.

$$L = 589 \text{ mm}$$

Deformasjon/hedbøyning av skinnen:

$$y_{\text{KS}} = \frac{Q_{\text{KS}}}{2bCL} \text{ mm} = \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,30 \cdot 589} \text{ mm} = 1,01 \text{ mm}$$

Moment i skinnen:

$$M_{\text{KS}} = \frac{Q_{\text{KS}}L}{4} \text{ Nm} = \frac{172.500 \cdot 589}{4} \text{ Nmm} = 25,401 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S54, motstandsmoment om X-aksen for foten $W_{x-x} = 276,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{\text{KS}}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{25.401.000}{276.000} \text{ N/mm}^2 = 92,0 \text{ N/mm}^2$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{\text{KS}} = C_{\text{RES}} y_{\text{KS}} \text{ N/mm}^2 = 0,30 \times 1,01 \text{ N/mm}^2 = 0,303 \text{ N/mm}^2$$

Støttepunktkraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktkraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{\text{KS}} = b a p_{\text{KS}} = 481 \times 520 \times 0,303 \text{ N} = 75,8 \text{ kN}$$

2.1.4.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v , sporstandard k , standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned}v &= 1,0 \\k &= 0,2 \\s &= 0,2 \\t &= 3\end{aligned}$$

Ekstremfaktor d :

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{\text{DYN}} = Q_{\text{KS}} \times d = 172,50 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{276,0 \text{ kN}}$$

$$y_{\text{DYN}} = y_{\text{KS}} \times d = 1,01 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{1,62 \text{ mm}}$$

$$M_{\text{DYN}} = M_{\text{KS}} \times d = 25,401 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{40,642 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = \sigma_{\text{FOT U.K. KS}} \times d = 92,0 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{147,2 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{\text{DYN}} = p_{\text{KS}} \times d = 0,303 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,485 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{\text{DYN}} = S_{\text{KS}} \times d = 75,8 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{121,3 \text{ kN}}$$

2.1.4.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{\text{BRUDD}} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = 92,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = 147,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{\text{EGEN FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{\text{TEMP}} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{\text{SAMLET}} = \sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} + \sigma_{\text{EGEN FOT}} + \sigma_{\text{TEMP}} = 147,2 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 397,2 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2.$$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 147,2 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 30 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,30 N/mm³, S54, 30 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville ($0,485 > 0,30 \text{ N/mm}^2$).
- Støttepunktkraften er mindre enn kravet for betongsville ($121,3 \text{ kN} < 150 \text{ kN}$).

2.1.5 Aksellast P = 25 tonn, UIC60

2.1.5.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 25 \text{ tonn} \sim 250 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 250/2 \text{ kN} = \underline{125 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 125 \text{ kN} = 18,75 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 125 \text{ kN} + 18,75 \text{ kN} = \underline{143,75 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

Langsvillebredde: $b = \underline{481 \text{ mm}}$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,30 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

Skinneprofil UIC60, elastisitetsmodul $E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,
treghetsmoment om X-aksen $I_{x-x} = 3.055 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 30.550.000}{481 \cdot 0,30}} \text{ mm} = \underline{649 \text{ mm}}$$

Kontrollen av akselavstanden viser at den er mindre enn $2,36 L$:

$$2,36L = 2,36 \times 649 \text{ mm} = 1.532 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm og } 1.500 \text{ mm}$$

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene både i to nye og to gamle malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningsene.

Forholdet x/L er 2,19 for $x = 1.420 \text{ mm}$ og 2,31 for 1.500 mm . Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Siden $2,36 L$ er større enn 1.420 mm , må det regnes med 2 aksler som har denne inbyrdes avstanden. Superposisjonsprinsippet benyttes for å få den maksimale deformasjonen/nedbøyningen av skinnen. Det leddet med cosinus og sinus må regnes ut i radianer. $y_{KS \text{ TOTAL}} = y_{KS}(x = 0) + y_{KS}(x = 1420)$.

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm.

$$y_{KS\ TOTAL} = \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,30 \cdot 649} + \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,30 \cdot 649} e^{-\frac{1420}{649}} \left(\cos \frac{1420}{649} + \sin \frac{1420}{649} \right)$$

$$y_{KS\ TOTAL} = 0,77 + 0,02 = \underline{0,79\ \text{mm}}$$

For $x = 1.500$ mm blir nedbøyningstillegget på 0,005 mm.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS} L}{4} \text{ Nm} = \frac{143.750 \cdot 649}{4} \text{ Nmm} = \underline{23.323 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil UIC60, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 377,4 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = \frac{M_{KS}}{W_{FOT}} \text{ N/mm}^2 = \frac{23.323.000}{377.400} \text{ N/mm}^2 = \underline{61,8 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{RES} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,30 \times 0,79 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,237 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktkraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktkraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,237 \text{ N} = \underline{59,3 \text{ kN}}$$

2.1.5.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v , sporstandard k , standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$v = 1,0$$

$$k = 0,2$$

$$s = 0,2$$

$$t = 3$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 143,75 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{230,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 0,79 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{1,26 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 23,323 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{37,317 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = \sigma_{FOT\ U.K.\ KS} \times d = 61,8 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{98,9 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,237 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,379 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 59,3 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{94,9 \text{ kN}}$$

2.1.5.3 SkinnespenningerSkinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{BRUDD} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = 61,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = 98,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{EGEN\ FOT} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{TEMP} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{SAMLET} = \sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} + \sigma_{EGEN\ FOT} + \sigma_{TEMP} = 98,9 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 348,9 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2.$$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 98,9 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 25 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,30 N/mm³, UIC60, 25 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,379 > 0,30 N/mm²).
- Støttepunktkraften er mindre enn kravet for betongsville (94,9 < 150 kN).

2.1.6 Aksellast P = 30 tonn, UIC60

2.1.6.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 30 \text{ tonn} \sim 300 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 300/2 \text{ kN} = \underline{150 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 150 \text{ kN} = 22,50 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 150 \text{ kN} + 22,50 \text{ kN} = \underline{172,50 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$C_{RES} = 0,30 \text{ N/mm}^3$$

Grunnverdi L:

For beskrivelse av grunnverdi L henvises det til kap. 2.1.5.1.

$$L = 649 \text{ mm}$$

Kontrollen av akselavstanden viser at den er mindre enn 2,36 L:

$$2,36L = 2,36 \times 649 \text{ mm} = 1.532 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm og } 1.500 \text{ mm}$$

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene i to nye malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningene.

Forholdet x/L er 2,19 for $x = 1.420 \text{ mm}$ og 2,31 for 1.500 mm . Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Siden $2,36 L$ er større enn 1.420 mm , må det regnes med 2 aksler som har denne inbyrdes avstanden. Superposisjonsprinsippet benyttes for å få den maksimale deformasjonen/nedbøyningen av skinnen. Det leddet med cosinus og sinus må regnes ut i radianer. $y_{KS \text{ TOTAL}} = y_{KS}(x = 0) + y_{KS}(x = 1420)$.

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm .

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,30 \cdot 649} + \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,30 \cdot 649} e^{-\frac{1420}{649}} \left(\cos \frac{1420}{649} + \sin \frac{1420}{649} \right)$$

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = 0,92 + 0,02 = 0,94 \text{ mm}$$

For $x = 1.500 \text{ mm}$ blir nedbøyningstillegget på $0,006 \text{ mm}$.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS} L}{4} \text{ Nm} = \frac{172.500 \cdot 649}{4} \text{ Nmm} = \underline{27.988 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil UIC60, motstandsmoment om X-aksen for foten $W_{x-x} = 377,4 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} = \frac{M_{KS}}{W_{FOT}} \text{ N/mm}^2 = \frac{27.988.000}{377.400} \text{ N/mm}^2 = \underline{74,2 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{RES} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,30 \times 0,94 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,282 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunkt kraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunkt kraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,282 \text{ N} = \underline{70,5 \text{ kN}}$$

2.1.6.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned} v &= 1,0 \\ k &= 0,2 \\ s &= 0,2 \\ t &= 3 \end{aligned}$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 172,50 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{276,0 \text{ kN}}$$

$$y_{\text{DYN}} = y_{\text{KS}} \times d = 0,94 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{1,50 \text{ mm}}$$

$$M_{\text{DYN}} = M_{\text{KS}} \times d = 27,988 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{44,781 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = \sigma_{\text{FOT U.K. KS}} \times d = 74,2 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{118,7 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{\text{DYN}} = p_{\text{KS}} \times d = 0,282 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,451 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{\text{DYN}} = S_{\text{KS}} \times d = 70,5 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{112,8 \text{ kN}}$$

2.1.6.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{\text{BRUDD}} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = 74,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = 118,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{\text{EGEN FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{\text{TEMP}} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{\text{SAMLET}} = \sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} + \sigma_{\text{EGEN FOT}} + \sigma_{\text{TEMP}} = 118,7 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 368,7 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2.$$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 118,7 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 30 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,30 N/mm³, UIC60, 30 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,451 > 0,30 N/mm²).
- Støttepunktraften er mindre enn kravet for betongsville (112,8 < 150 kN).

2.1.7 Sammenstilling av resultater for beregninger med C = 0,30 N/mm³

I figur 2.1.7.i er beregningsresultatene med ballastsiffer C = 0,30 N/mm³ vist.

		S49		S54		UIC60	
		25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
K V A S I S T A T I S K	Q ₀ (kN)	125	150	125	150	125	150
	Q _{KS} (kN)	143,75	172,50	143,75	172,50	143,75	172,50
	y _{KS} (mm)	0,87	1,05	0,85	1,01	0,79	0,94
	M _{KS} (Nmm)	20,484 x 10 ⁶	24,581 x 10 ⁶	21,167 x 10 ⁶	25,401 x 10 ⁶	23,323 x 10 ⁶	27,988 x 10 ⁶
	σ _{FOT U.K. KS} (N/mm ²)	85,4	102,4	76,7	92,0	61,8	74,2
	p _{KS} (N/mm ²)	0,261	0,315	0,255	0,303	0,237	0,282
	S _{KS} (kN)	65,3	78,8	63,8	75,8	59,3	70,5
	D Y N A M I S K	Q _{DYN} (kN)	230	276	230	276	230
y _{DYN} (mm)		1,39	1,68	1,36	1,62	1,26	1,50
M _{DYN} (Nmm)		32,774 x 10 ⁶	39,330 x 10 ⁶	33,867 x 10 ⁶	40,642 x 10 ⁶	37,317 x 10 ⁶	44,781 x 10 ⁶
σ _{FOT U.K. DYN} (N/mm ²)		136,6	163,8	122,7	147,2	98,9	118,7
p _{DYN} (N/mm ²)		0,418	0,504	0,408	0,485	0,379	0,451
p _{DYN BET. SVILLE} (N/mm ²)		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
S _{DYN} (kN)		104,5	126,1	102,1	121,3	94,9	112,8
S _{DYN BET. SVILLE} (kN)		150	150	150	150	150	150
σ _{FOT U.K. SAMLET} (N/mm ²)	386,0	413,8	372,7	397,2	348,9	368,7	

Figur 2.1.7.i

2.1.8 Kontroll av kvasistatiske- og dynamiske spenninger

Hvis levetid og økonomi for skinner vurderes, viser erfaringer fra Tyskland at de kvasistatiske og dynamiske beregningsspenningene ikke bør overstige henholdsvis 7 - 9 % og 11 - 15 % av spenningspotensialet i en skinne ved brudd [J. Eisenmann, G. Leykauf og L. Mattner: "Vorschläge zur Erhöhung der Oberbauelastizität", Eisenbahntechnische Rundschau 1994 7/8]. Disse tallene gjelder for høyhastighetsbaner med ICE-materiell og må modifiseres for bruk på Ofofbanen. Sikkerhetsfaktoren tyskerne benytter på grunn av høyhastighet reduseres fra 1,5 til 1,4 (største hastighet på Ofofbanen er 90 km/h imotsetning til 250 km/h på DBAG's høyhastighetsnett), mens den kvasistatiske og dynamiske faktoren reduseres fra 1,8 til 1,6 (likevektshastighet for lastede malmtog på Ofofbanen). Dette gir et forhold mellom de tyske sikkerhetsfaktorene og de som kan benyttes for Ofofbanen på 1,21 ($1,5 \times 1,8 / 1,4 \times 1,6$) og betyr at de ovenfornevnte prosenttallene kan økes med 21%. Ved å bruke middeltallet, får vi at den kvasistatiske beregningsspenningen ikke bør overstige 10% av spenningspotensialet av bruddspenningen og den dynamiske spenningen ikke bør overstige 16%.

Grensen for den kvasistatiske spenningen blir da:

$$0,10 \times \sigma_{\text{BRUDD}} > \text{beregnet spenning}$$

For 900-, 1200- og 1400-kvalitet betyr dette:

$$0,10 \times 880 = \underline{88,0 \text{ N/mm}^2}$$

$$0,10 \times 1180 = \underline{118,0 \text{ N/mm}^2}$$

$$0,10 \times 1380 = \underline{138,0 \text{ N/mm}^2}$$

Tilsvarende for den dynamiske spenningen blir:

$$0,16 \times \sigma_{\text{BRUDD}} > \text{beregnet spenning}$$

For 900-, 1200- og 1400-kvalitet betyr dette:

$$0,16 \times 880 = \underline{140,8 \text{ N/mm}^2}$$

$$0,16 \times 1180 = \underline{188,8 \text{ N/mm}^2}$$

$$0,16 \times 1380 = \underline{220,8 \text{ N/mm}^2}$$

I figur 2.1.8.i vises opptredende kvasistatiske og dynamiske skinnespenninger i senter underkant fot i forhold til de justerte, erfaringsmessige grenseverdiene.

Mørklagte ruter betyr at verdiene overskrider de tilrådede grensene.

		S49		S54		UIC60	
		25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
K S	Krav 900 (N/mm ²)	88,0	88,0				
	Krav 1200 (N/mm ²)			118,0	118,0	118,0	118,0
	Krav 1400 (N/mm ²)					138,0	138,0
	$\sigma_{\text{FOTLUK KS}}$ (N/mm ²)	85,4	102,4	76,7	92,0	61,8	74,2
D Y N	Krav 900 (N/mm ²)	140,8	140,8				
	Krav 1200 (N/mm ²)			188,8	188,8	188,8	188,8
	Krav 1400 (N/mm ²)					220,8	220,8
	$\sigma_{\text{FOTLUK DYN}}$ (N/mm ²)	136,6	163,8	122,7	147,2	98,9	118,7

Figur 2.1.8.i

Konklusjon:

- Det anbefalte kravet til kvasistatiske og dynamiske skinnespenninger utfra en vurdering av levetid og økonomi, overskrides for S49 og en aksellast på 30 tonn.
- Ingen overskridelser av anbefalte grenser ved andre skinnelastkombinasjoner.

2.2 KOMBINASJON AV HORIZONTALA OG VERTIKALE KREFTER Y/Q-FORHOLD

2.2.1 Horisontale/laterale krefter Y

De horisontale/laterale kreftene kan inndeles i kvasistatiske og dynamiske krefter. Av kvasistatiske kreftene er det spesielt 2 begrep som har interesse. Det ene er styringskraften P_A som har betydning for vurdering av slitasje på skinnhodet. Det andre er føringskraften $Y_{\text{føring}}$. Denne kraften har betydning for vurdering av sporets føringsevne samt faren for avsporing. Føringskraften er avhengig av friksjonskreftene og styringskraften P_A .

Vi har følgende kvasistatiske laterale krefter: føringskraft (flenskraft), sentrifugalkraft og vindkraft.

$$Y_{KS} = Y_{\text{føring}} + Y_{\text{sentr.}} + Y_{\text{vind}}$$

Dynamiske laterale krefter forårsakes av justeringsfeil i sporet, egenenererte svingninger av det rullende materiellet og ujevn lastfordeling mellom akslene. Det dynamiske tillegget for den kvasistatiske laterale kraften beregnes på samme måte som for det dynamiske tillegget til den kvasistatiske vertikalkraften. Se kap. 2.1.1.2.

$$Y_{DYN} = Y_{KS} \times d$$

I praksis er det vanskelig å beregne de forskjellige komponentene for den samlede Y-kraft. Vi ser derfor gjerne på en kombinasjon av Y- og Q-krefter.

2.2.1.1 Kombinasjon av Y- og Q-krefter

Man kan beregne skinnespenninger ut ifra om at det er ett-punkts berøring eller to-punkts berøring. Ett-punkts berøring medfører at de vertikale og horisontale kreftene angriper skinnen i samme punktet, og det er denne formen for berøring som brukes til beregning av skinnespenninger her. Med de erfaringer som er gjort, kan Y-kreftene uttrykkes som en funksjon av Q-kreftene.

For å finne horisontalkraften Y_{DYN} varierer man Y/Q-forholdet fra 0,3 - 1,2 x Q_{DYN} .

Det formelverket som nyttes her for kombinerte krefter, er beskrevet i «Modern Railway Track» av Coenraad Esveld.

Spenninger i underkant skinnhode:

$$\sigma_{HI,II} = -\sigma_{BH} + 0,9(\Delta\sigma_{1H} \pm \Delta\sigma_{2H} \pm \Delta\sigma_{3H})$$

Spenninger i underkant og ytterst skinnefot :

$$\sigma_{FIII,IV} = +\sigma_{BF} + 0,9(m\Delta\sigma_{2F} \pm \Delta\sigma_{3F})$$

$$\sigma_{BH} = \lambda_{0H} \times M_B$$

$$\Delta\sigma_{1H} = \lambda_{1H} \times Q_{DYN}$$

$$\Delta\sigma_{2H} = \lambda_{2H} \times M_W$$

$$\Delta\sigma_{3H} = \lambda_{3H} \times Y_{DYN}$$

$$M_B = \frac{Q_{DYN} \cdot L}{4}$$

$$M_W = Y_{DYN} \times h - Q_{DYN} \times e$$

$$\sigma_{BF} = \lambda_{0F} \times M_B$$

$$\Delta\sigma_{2F} = \lambda_{2F} \times M_W$$

$$\Delta\sigma_{3F} = \lambda_{3F} \times Y_{DYN}$$

Skinneprofil		S49	S54	UIC60	
Eksentrisitet e	(cm)	3,5	3,5	3,715	
Avstand h fra skjærsenter til Y-kraft	(cm)	9,9	10,2	12,9	
Skinnehode I,II	λ_{0H}	(cm ⁻³)	0,002	0,0017	0,0018
	λ_{1H}	(cm ⁻²)	0,054	0,049	0,05
	λ_{2H}	(cm ⁻³)	0,016	0,014	0,017
	λ_{3H}	(cm ⁻²)	0,16	0,14	0,11
Skinnefot III,IV	λ_{0F}	(cm ⁻³)	0,004	0,0036	0,0027
	λ_{2F}	(cm ⁻³)	0,0152	0,0131	0,0126
	λ_{3F}	(cm ⁻²)	0,298	0,261	0,229

Figur 2.2.1.1.i

I tillegg til de vanlige skinnespenninger som kan beregnes etter de formlene som er beskrevet ovenfor, kommer spenninger som skyldes horisontal bøyning på grunn av kurve inn i bildet.

$$\text{For skinnehodet I,II : } \sigma_b = \pm \frac{Eb}{2R} \text{ N/mm}^2$$

$$\text{For skinnefoten III,IV : } \sigma_b = \pm \frac{EB}{2R} \text{ N/mm}^2$$

hvor

$$E = \text{elastisitetsmodul} = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$$

b = skinnehodets bredde i mm

B = skinnefotens bredde i mm

R = kurveradius i mm

For spenninger som skyldes bøyning i kurve, er de bare avhengig av skinnehodets og skinnefotens bredde. De forandres bare ved en økende eller minkende kurveradie.

I figur 2.2.1.1.ii er det regnet ut for kurveradier med 50 meters mellomrom med start på $R = 200$ m. Dette er spenninger som må legges til den ekstremspenningen som man har på skinnehodet og skinnefoten. Den er ikke avhengig av aksellasten som trafikkeres på skinnene.

Radius (m)	S49/S54		UIC60	
	$\sigma_{\text{HODE}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_{\text{FOT}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_{\text{HODE}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_{\text{FOT}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
200	36,8	65,6	39,0	78,8
250	29,4	52,5	31,2	63,0
300	24,5	43,8	26,0	52,5
350	21,0	37,5	22,3	45,0
400	18,4	32,8	19,5	39,4
450	16,3	29,2	17,3	35,0
500	14,7	26,3	15,3	31,5
550	13,4	23,9	14,2	28,6
600	12,3	21,9	13,0	26,3
650	11,3	20,2	12,0	24,2
700	10,5	18,8	11,2	22,5

Figur 2.2.1.1.ii

Grunnen til at UIC60 har større spenningstillegg enn S49/S54, er at skinnehodet og skinnefoten er bredere på UIC60 enn på S49/S54. S49 og S54 har samme bredde på både skinnehodet og skinnefoten.

2.2.2 Skinnespenninger for S49, P = 25 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil S49
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentriske belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{\text{DYN}} = 230 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{\text{DYN}}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{\text{TEMP}} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 230$ kN er vist i figur 2.2.2.i.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
σ_{HODE}	129,2	195,1	261,0	327,0	392,9	458,8	524,7	590,6	656,5	722,4
σ_{FOT}	330,5	361,0	391,5	422,1	452,6	483,1	513,7	544,2	574,8	605,3
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE YTTERST}$	219,2	285,1	351,0	417,0	482,9	548,8	614,7	680,6	746,5	812,4
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	400,5	431,0	461,5	492,1	522,6	553,1	583,7	614,2	644,8	675,3

Figur 2.2.2.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 1.

2.2.3 Skinnespenninger for S49, P = 30 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,30$ N/mm³ (Antatt)
- Skinneprofil S49
- Hastighet $V = 50$ km/h
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 276$ kN
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode.
- Egenspenninger
 - Skinnehode : -40,0 N/mm²
 - Skinnefot : -60,0 N/mm²
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0$ N/mm²

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 276$ kN er vist i figur 2.2.3.i.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider bruddspenningen.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
σ_{HODE}	155,1	234,2	313,3	392,3	471,4	550,5	629,6	708,7	787,8	866,9
σ_{FOT}	396,5	433,2	469,8	506,5	543,1	579,8	616,4	653,1	689,7	726,3
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE YTTERST}$	245,1	324,2	403,3	482,3	561,4	640,5	719,6	798,7	877,8	956,9
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	466,5	503,2	539,8	576,5	613,1	649,8	686,4	723,1	759,7	796,3

Figur 2.2.3.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 2.

2.2.4 Skinnespenninger for S54, P = 25 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinnprofil S54
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 230 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 230 \text{ kN}$ er vist i figur 2.2.4.i.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
σ_{HODE}	119,1	177,6	236,2	294,7	353,3	411,8	470,3	528,9	587,4	646,0
σ_{FOT}	293,7	320,1	346,4	382,8	399,2	425,6	451,9	478,3	504,7	531,0
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE YTTERST}$	209,1	267,6	326,2	384,7	443,3	501,8	560,3	618,9	677,4	736,0
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	363,7	390,1	416,4	442,8	469,2	495,6	521,9	548,3	574,8	601,0

Figur 2.2.4.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 3.

2.2.5 Skinnespenninger for S54, P = 30 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil S54
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$ er vist i figur 2.2.5.i.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
σ_{HODE}	142,9	213,2	283,4	353,7	423,9	494,2	564,4	634,6	704,9	775,1
σ_{FOT}	352,5	384,1	415,7	447,4	469,0	510,7	522,3	573,9	605,6	637,2
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE YTTERST}$	232,9	303,2	373,4	443,7	513,9	584,2	654,4	724,6	794,9	865,1
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	422,5	454,1	485,7	517,4	549,0	580,7	612,3	643,9	675,6	707,2

Figur 2.2.5.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 4.

2.2.6 Skinnespenninger for UIC60, P = 25 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil UIC60
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 230 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 230 \text{ kN}$ er vist i figur 2.2.6.i.

Den største spenningen på skinnehodet er den på siden hvor lasten blir påført for aksellast på 25 tonn. Et negativt tall angir at det er trykkspenninger.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
σ_{HODE}	-36,2	-104,4	-172,5	-240,7	-308,9	-377,0	-445,2	-513,4	-581,5	-649,7
σ_{FOT}	237,1	250,8	264,6	278,4	292,1	305,9	319,6	333,4	347,1	360,9
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE INNERST}$	-260,2	-274,4	-342,5	-410,7	-478,9	-547,0	-615,2	-683,4	-751,5	-819,7
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	307,1	320,8	334,6	348,4	362,1	375,9	389,6	403,4	417,1	430,9

Figur 2.2.6.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 5.

2.2.7 Skinnespenninger for UIC60, P = 30 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil UIC60
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$ er vist i 2.2.7.i.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
σ_{HODE}	133,6	215,4	297,2	379,0	460,8	542,6	624,4	706,2	788,0	869,8
σ_{FOT}	284,5	301,0	317,5	334,0	350,5	367,0	383,5	400,1	416,6	433,1
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE YTTERST}$	223,6	305,4	387,2	469,0	550,8	632,6	714,4	796,2	878,0	959,8
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	354,5	371,0	387,5	404,0	420,5	437,0	453,5	470,1	486,6	503,1

Figur 2.2.7.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 6.

2.2.8 Vurdering av de dynamiske kreftene fra en boggi

Hvis ikke boggikonstruksjonen forandres, så de dynamiske kreftene blir mindre, kan de bare påvirkes gjennom ekstremfaktor d. Den er avhengig av hastighetavhengig faktor v, sporstandarden k og statistisk sikkerhet t. Nå er det bare sporstandarden som kan forandres da hastigheten er så lav, og vi ønsker ikke å gå ned på den statistiske sikkerheten mot brudd på skinnen.

Det dynamiske lasttillegget beregnes for en aksellast på 25 tonn og den samme tallverdien benyttes for videre beregninger for en aksellast på 30 tonn. Ekstremfaktor d = 1,6 for 25 tonn og det vil si en 60 % økning på grunn av dynamiske krefter. Dette fører til at:

$$\Delta Q_{DYN} = Q_{KS} \times (d - 1,0) = 143,75 \times (1,6 - 1,0) \text{ kN} = \underline{86,25 \text{ kN}}$$

Når man har det dynamiske lasttillegget kan man beregne en ny ekstremfaktor d for 30 tonn. I denne beregningen bruker man dette dynamiske lasttillegget og den kvasistatiske lasten for 30 tonn.

$$\frac{\Delta Q_{DYN25}}{Q_{KS30}} = \frac{86,25}{172,50} \times 100 \% = 50 \% \text{ i dynamiske tillegg, det vil si } d = 1,5.$$

Hvis ikke boggikonstruksjonen reduserer de dynamiske tilleggene, er det bare sporstandarden k som kan forandres, så blir den nye sporstandarden som man må ha for å tilfredstille kravet om at de dynamiske tilleggslastene ikke skal øke i forhold til idag, blir:

$$d = (1,0 + t \times k \times v) \Rightarrow 1,5 = (1,0 + 3 \times k \times 1) \Rightarrow k = \frac{0,5}{3} = \underline{0,17}$$

Ved å øke sporstandarden k kan man redusere de dynamiske lasttilleggene som påføres skinnene. Antar at sporstandarden bedres til $k = 0,15$. Denne forandringen medfører endringer på de dynamiske kreftene for en aksellast på 30 tonn.

Ekstremfaktoren d blir da $(1,0 + 3 \times 0,15) = 1,45$. Spenningene beregnet med $d = 1,45$ sammenlignes med de beregningene som ble gjort tidligere med $k = 0,2$ både for 25 tonns og 30 tonns aksellast og er vist i figur 2.2.8.i.

		Q_{DYN} (kN)	y_{DYN} (mm)	M_{DYN} (10^6 Nmm)	$\sigma_{FORLIK DYN}$ (N/mm ²)	p_{DYN} (N/mm ²)	S_{DYN} (kN)	$\sigma_{FOT SAMLET}$ (N/mm ²)
S 4 9	25 t (k=0,2)	230	1,39	32,774	136,6	0,418	104,5	386,0
	30 t (k=0,2)	276	1,68	39,330	163,8	0,504	126,1	413,8
	30 t (k=0,15)	250	1,52	36,643	148,5	0,457	114,3	398,5
S 5 4	25 t (k=0,2)	230	1,36	33,867	122,7	0,408	102,1	372,7
	30 t (k=0,2)	276	1,62	40,642	147,2	0,485	121,3	397,2
	30 t (k=0,15)	250	1,46	36,831	133,4	0,439	109,9	383,4
U I C 6 0	25 t (k=0,2)	230	1,26	37,317	98,9	0,379	94,9	348,9
	30 t (k=0,2)	276	1,50	44,781	118,7	0,451	112,8	368,7
	30 t (k=0,15)	250	1,36	40,583	107,6	0,409	102,2	357,6

Figur 2.2.8.i

De horisontale kreftene og skinnespenningene i hjørnene blir da endret siden sporstandarden forandres.

I figur 2.2.8.ii er skinnespenningene for $k = 0,15$ og $P = 30$ tonn beregnet.

	$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
S49	Y_{DYN} (kN) k = 0,15	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{SAMLET HODE YTT.}$	230,5	302,2	373,9	445,6	517,2	588,9	660,6	732,3	803,9	875,6
	$\sigma_{SAMLET FOT YTT.}$	429,4	462,6	495,8	529,0	562,2	595,4	628,6	661,8	695,0	728,3
S54	Y_{DYN} (kN) k = 0,15	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{SAMLET HODE YTT.}$	219,5	283,2	346,8	410,5	474,2	537,8	601,5	665,1	728,8	792,5
	$\sigma_{SAMLET FOT YTT.}$	389,4	418,1	446,8	475,4	504,1	532,8	561,5	590,1	618,8	647,5
	Y_{DYN} (kN) k = 0,15	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300

UIC60	$\sigma_{\text{SAMLET HODE YTT.}}$	211,1	285,2	359,3	433,5	507,6	581,7	655,8	730,0	804,1	878,2
	$\sigma_{\text{SAMLET FOT YTT.}}$	327,8	342,8	357,7	372,7	387,7	402,6	417,6	432,6	447,5	462,5

Figur 2.2.8.ii

2.3 SAMMENDRAG FOR BEREGNINGER MED $C = 0,30 \text{ N/MM}^3$

For disse tre skinneprofilene er det flere felles parametre. De kan kort nevnes slik:

- Kvasistatisk tillegg (15 %)
- Langsvillebredde $b = 481 \text{ mm}$
- Svilleavstand $a = 520 \text{ mm}$
- Ballastsiffer $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$
- Hastighetsavhengig faktor $v = 1,0$
- Sporstandard $k = 0,2$
- Statistisk sikkerhet $t = 3$
- Hjulradien på godsvognene $r = 490 \text{ mm}$

Grunnverdi L er avhengig av skinneprofilenes treghetsmoment om X-aksen.

Resultatene for beregningene i kvasistatisk og dynamisk tilstand for S49, S54 og UIC60 er sammenstilt i figur 2.3.i og den viser forskjellene i spenningene, kreftene og nedbøyningen.

		S49		S54		UIC60	
		25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
K V A S T I S T I S K	Q_0 (kN)	125	150	125	150	125	150
	Q_{KS} (kN)	143,75	172,50	143,75	172,50	143,75	172,50
	y_{KS} (mm)	0,87	1,05	0,85	1,01	0,79	0,94
	M_{KS} (10^6 Nmm)	20,484	24,581	21,167	25,401	23,323	27,988
	$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}}$ (N/mm^2)	85,4	102,4	76,7	92,0	61,8	74,2
	p_{KS} (N/mm^2)	0,261	0,315	0,255	0,303	0,237	0,282
	S_{KS} (kN)	65,3	78,8	63,8	75,8	59,3	70,5
D Y N A M I S K	Q_{DYN} (kN)	230	276	230	276	230	276
	y_{DYN} (mm)	1,39	1,68	1,36	1,62	1,26	1,50
	M_{DYN} (10^6 Nmm)	32,774	39,330	33,867	40,642	37,317	44,781
	$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}}$ (N/mm^2)	136,6	163,8	122,7	147,2	98,9	118,7
	p_{DYN} (N/mm^2)	0,418	0,504	0,408	0,485	0,379	0,451
	$p_{\text{DYN RET. SVILLE}}$ (N/mm^2)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	S_{DYN} (kN)	104,5	126,1	102,1	121,3	94,9	112,8

$S_{DYN\ RET.\ SVILLE}$ (kN)	150	150	150	150	150	150
$\sigma_{FOT\ II.K.\ SAMLET}$ (N/mm ²)	386,0	413,8	372,7	397,2	348,9	368,7

Figur 2.3.i

Det er resultatene for de dynamiske tilstandene som er av størst interesse i denne sammenhengen. I tillegg til de samme parametrene som ovenfor kommer spenningene i hjørnene på skinnene inn. De er avhengige av den horisontale kraften, som igjen er avhengig av forholdet mellom de vertikale og de horisontale kreftene, som påføres skinnene av malmvognene. I figur 2.3.ii vises ekstremverdiene.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider bruddspenningen.

		(Y/Q) _{DYN}	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
S49	Y_{DYN} 25t		69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
	$\sigma_{HODE\ YTT.}$		219,2	285,1	351,0	417,0	482,9	548,8	614,7	680,6	746,5	812,4
	$\sigma_{BRUDD} = \sigma_{FOT\ YTT.}$		400,5	431,0	461,5	492,1	522,6	553,1	583,7	614,2	644,8	675,3
880	Y_{DYN} 30t		82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
	$\sigma_{HODE\ YTT.}$		245,1	324,2	403,3	482,3	561,4	640,5	719,6	798,7	877,8	956,9
	$\sigma_{FOT\ YTT.}$		466,5	503,2	539,8	576,5	613,1	649,8	686,4	723,1	759,7	796,3
S54	Y_{DYN} 25t		69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
	$\sigma_{HODE\ YTT.}$		209,1	267,6	326,2	384,7	443,3	501,8	560,3	618,9	677,4	736,0
	$\sigma_{BRUDD} = \sigma_{FOT\ YTT.}$		363,7	390,1	416,4	442,8	469,2	495,6	521,9	548,3	574,8	601,0
1180	Y_{DYN} 30t		82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
	$\sigma_{HODE\ YTT.}$		232,9	303,2	373,4	443,7	513,9	584,2	654,4	724,6	794,9	865,1
	$\sigma_{FOT\ YTT.}$		422,5	454,1	485,7	517,4	549,0	580,7	612,3	643,9	675,6	707,2
UIC60	Y_{DYN} 25t		69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
	$\sigma_{HODE\ INN.}$		-260,2	-274,4	-342,5	-410,7	-478,9	-547,0	-615,2	-683,4	-751,5	-819,7
	$\sigma_{BRUDD} = \sigma_{FOT\ YTT.}$		307,1	320,8	334,6	348,4	362,1	375,9	389,6	403,4	417,1	430,9
1180	Y_{DYN} 30t		82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
	$\sigma_{HODE\ YTT.}$		223,6	305,4	387,2	469,0	550,8	632,6	714,4	796,2	878,0	959,8
	$\sigma_{FOT\ YTT.}$		354,5	371,0	387,5	404,0	420,5	437,0	453,5	470,1	486,6	503,1

Figur 2.3.ii

Figur 2.3.ii viser at det er kun i ett tilfelle hvor bruddspenningen overskrides (S49, Y/Q-forhold 1,2). Spenningene i skinnehodet ved 30

tonn blir større for UIC60 enn for S54 når $(Y/Q)_{DYN} \geq 0,4$. Både S54 og UIC60 har en bruddgrense på 1180 N/mm^2 , mens S49 har en bruddgrense på 880 N/mm^2 . I tillegg kan UIC60 ha en bruddgrense på 1380 N/mm^2 .

I beregningene som er utført, har det dynamiske lasttillegget den samme %-andelen for både 25 tonn og 30 tonn (60 %). Hvis man ikke skal øke det dynamiske lasttillegget, som man har på Ofotbanen idag, men beholde det også på 30 tonn, må man redusere %-andelen på lasttillegget fra 30 tonn fra 60 % til 50 %. Dette kan bare oppnås ved å bedre sporstandarden. Ved å senke k fra 0,2 til 0,15 vil lasttillegget bli redusert fra 60 % til 45 % [se figur 2.3.iii]. Grenseverdien for tillatt trafikkspenning med tanke på utmatting er for 900-kvalitet 185 N/mm^2 i underkant senter skinnefot. Ved en høyere stål kvalitet (1200) vil denne grenseverdien øke med 20 - 30 %. Det skulle derfor ikke være fare for utmatting av skinnene.

		Q_{DYN} (kN)	y_{DYN} (mm)	M_{DYN} (10^6 Nmm)	$\sigma_{FORLIK DYN}$ (N/mm^2)	P_{DYN} (N/mm^2)	S_{DYN} (kN)	$\sigma_{FOT SAMLET}$ (N/mm^2)
S 4 9	25 t (k=0,2)	230	1,39	32,774	136,6	0,418	104,5	386,0
	30 t (k=0,2)	276	1,68	39,330	163,8	0,504	126,1	413,8
	30 t (k=0,15)	250	1,52	36,643	148,5	0,457	114,3	398,5
S 5 4	25 t (k=0,2)	230	1,36	33,867	122,7	0,408	102,1	372,7
	30 t (k=0,2)	276	1,62	40,642	147,2	0,485	121,3	397,2
	30 t (k=0,15)	250	1,46	36,831	133,4	0,439	109,9	383,4
U I C 6 0	25 t (k=0,2)	230	1,26	37,317	98,9	0,379	94,9	348,9
	30 t (k=0,2)	276	1,50	44,781	118,7	0,451	112,8	368,7
	30 t (k=0,15)	250	1,36	40,583	107,6	0,409	102,2	357,6

Figur 2.3.iii

Figur 2.3.iv viser at ved å bedre sporstandarden, reduseres de horisontale kreftene og skinnespenningene.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider bruddspenningen.

		(Y/Q) _{DYN}	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	
S49	$Y_{DYN} k = 0,2$		82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331	
	$\sigma_{HODE YTT.}$		245,1	324,2	403,3	482,3	561,4	640,5	719,6	798,7	877,8	956,9	
	$\sigma_{BRUDD} = \sigma_{FOT YTT.}$		466,5	503,2	539,8	576,5	613,1	649,8	686,4	723,1	759,7	796,3	
	880	$Y_{DYN} k = 0,15$		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	N/mm ²	$\sigma_{HODE YTT.}$		230,5	302,2	373,9	445,6	517,2	588,9	660,6	732,3	803,9	875,6
		$\sigma_{FOT YTT.}$		429,4	462,6	495,8	529,0	562,2	595,4	628,6	661,8	695,0	728,3
S54	$Y_{DYN} k = 0,2$		82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331	
	$\sigma_{HODE YTT.}$		232,9	303,2	373,4	443,7	513,9	584,2	654,4	724,6	794,9	865,1	
	$\sigma_{BRUDD} = \sigma_{FOT YTT.}$		422,5	454,1	485,7	517,4	549,0	580,7	612,3	643,9	675,6	707,2	
	1180	$Y_{DYN} k = 0,15$		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	N/mm ²	$\sigma_{HODE YTT.}$		219,5	283,2	346,8	410,5	474,2	537,8	601,5	665,1	728,8	792,5
		$\sigma_{FOT YTT.}$		389,4	418,1	446,8	475,4	504,1	532,8	561,5	590,1	618,8	647,5
UIC60	$Y_{DYN} k = 0,2$		82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331	
	$\sigma_{HODE YTT.}$		223,6	305,4	387,2	469,0	550,8	632,6	714,4	796,2	878,0	959,8	
	$\sigma_{BRUDD} = \sigma_{FOT YTT.}$		354,5	371,0	387,5	404,0	420,5	437,0	453,5	470,1	486,6	503,1	
	1180	$Y_{DYN} k = 0,15$		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	N/mm ²	$\sigma_{HODE YTT.}$		211,1	285,2	359,3	433,5	507,6	581,7	655,8	730,0	804,1	878,2
		$\sigma_{FOT YTT.}$		327,8	342,8	357,7	372,7	387,7	402,6	417,6	432,6	447,5	462,5

Figur 2.3.iv

2.4 KONKLUSJON FOR BALLASTSIFFER $C = 0,30 \text{ N/MM}^3$

Det vil ikke være noen fare for utmatningsbrudd i S49, S54 eller UIC60 ved en aksellastøkning fra 25 til 30 tonn.

De kvasistatiske og dynamiske skinnespenningene ved 30 tonn vil derimot overstige de justerte, tyske erfaringsmessige grenseverdiene for

spenningspotensialet i en skinne ved brudd for S49, og derfor bør sporvekslene med S49 skiftes ut.

Konklusjonen blir da at man kan beholde S54 (1200-kvalitet) ved $C = 0,30$ N/mm^3 , selv om aksellasten øker fra 25 til 30 tonn med hensyn til skinnespenninger og utmatting, men sporvekslene bør skiftes ut fra S49 til S54 (høyere stålqualität).

3. BEREGNING MED BALLASTSIFFER $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$

3.1 VERTIKALE KREFTER Q

3.1.1 Aksellast $P = 25 \text{ tonn}$, S49

3.1.1.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 25 \text{ tonn} \sim 250 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 250/2 \text{ kN} = \underline{125 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 125 \text{ kN} = 18,75 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 125 \text{ kN} + 18,75 \text{ kN} = \underline{143,75 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises til kap. 2.1.1.1.

Underbygningen er av varierende kvalitet med stedlige masser og fyllinger av løsmasser og litt leire. Derfor foretas også skinnespenningsberegninger med en lavere C -verdi enn $0,30 \text{ N/mm}^3$.

$$C_{RES} = \underline{0,20 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

Skinneprofil S49, elastisitetsmodul $E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, treghetsmoment om X-aksen $I_{x-x} = 1.819 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 18.190.000}{481 \cdot 0,20}} \text{ mm} = \underline{631 \text{ mm}}$$

Kontrollen av akselavstanden viser at den er mindre enn 2,36 L:

$$2,36L = 2,36 \times 631 \text{ mm} = 1.489 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm}$$

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene i to nye malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningsene.

Forholdet x/L er 2,25 for $x = 1.420 \text{ mm}$. Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget dvs. uten noe fratrekk i momentet.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm.

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 631} + \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 631} e^{-\frac{1420}{631}} \left(\cos \frac{1420}{631} + \sin \frac{1420}{631} \right)$$

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = 1,18 + 0,02 = \underline{1,20 \text{ mm}}$$

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS}L}{4} \text{ Nm} = \frac{143.750 \cdot 631}{4} \text{ Nmm} = \underline{22,677 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S49, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 240,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{\text{KS}}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{22.677.000}{240.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{94,5 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{\text{KS}} = C_{\text{RES}} y_{\text{KS}} \text{ N/mm}^2 = 0,20 \times 1,20 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,240 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunkt kraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunkt kraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{\text{KS}} = b a p_{\text{KS}} = 481 \times 520 \times 0,240 \text{ N} = \underline{60,0 \text{ kN}}$$

3.1.1.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$v = 1,0$$

$$k = 0,2$$

$$s = 0,2$$

$$t = 3$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{\text{DYN}} = Q_{\text{KS}} \times d = 143,75 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{230,0 \text{ kN}}$$

$$y_{\text{DYN}} = y_{\text{KS}} \times d = 1,20 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{1,92 \text{ mm}}$$

$$M_{\text{DYN}} = M_{\text{KS}} \times d = 22,677 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{36,283 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = \sigma_{\text{FOT U.K. KS}} \times d = 94,5 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{150,2 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{\text{DYN}} = p_{\text{KS}} \times d = 0,240 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,384 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{\text{DYN}} = S_{\text{KS}} \times d = 60,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{96,0 \text{ kN}}$$

3.1.1.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

Bruddspenningen $\sigma_{BRUDD} = 880 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} = 94,5 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = 150,2 \text{ N/mm}^2$

Egenspenning for senter skinnefot er: $\sigma_{EGEN \text{ FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$
Bruker en temperaturendring på $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Temperaturspenning: $\sigma_{TEMP} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$\sigma_{SAMLET} = \sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} + \sigma_{EGEN \text{ FOT}} + \sigma_{TEMP} = 150,2 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 400,2$
 $\text{N/mm}^2 < \sigma_{FLYT} = 580 \text{ N/mm}^2$.

$\sigma_{FLYT} = 580 \text{ N/mm}^2$ som er tatt fra Smiths anskuellesdiagram.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 150,2 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 900-kvalitet er det ikke noen fare for utmatting ved 25 tonn aksellast.

Konklusjon: (C = 0,20 N/mm³, S49, 25 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville ($0,384 > 0,30 \text{ N/mm}^2$).
- Støttepunkt kraften er mindre enn kravet for betongsville ($96,0 < 150 \text{ kN}$).

3.1.2 Aksellast P = 30 tonn, S49

3.1.2.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

P = 30 tonn ~ 300 kN

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 300/2 \text{ kN} = \underline{150 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 150 \text{ kN} = 22,50 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 150 \text{ kN} + 22,50 \text{ kN} = \underline{172,50 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 3.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,20 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

For beskrivelse av grunnverdi L henvises det til kap. 3.1.1.1.

$$L = \underline{631 \text{ mm}}$$

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm.

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 631} + \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 631} e^{-\frac{1420}{631}} \left(\cos \frac{1420}{631} + \sin \frac{1420}{631} \right)$$

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = 1,42 + 0,02 = \underline{1,44 \text{ mm}}$$

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel som er ugunstigste tilfelle.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS}L}{4} \text{ Nm} = \frac{172.500 \cdot 631}{4} \text{ Nmm} = \underline{27.212 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S49, motstandsmoment om X-aksen $W_{xx} = 240,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{KS}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{27.212.000}{240.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{113,4 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{\text{RES}} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,20 \times 1,44 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,288 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,288 \text{ N} = \underline{72,0 \text{ kN}}$$

3.1.2.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned} v &= 1,0 \\ k &= 0,2 \\ s &= 0,2 \\ t &= 3 \end{aligned}$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{\text{DYN}} = Q_{KS} \times d = 172,50 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{276,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 1,44 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{2,30 \text{ mm}}$$
$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 27,212 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{43,539 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = \sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} \times d = 113,4 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{181,4 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,288 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,461 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 72,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{115,2 \text{ kN}}$$

3.1.2.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{BRUDD} = 880 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} = 113,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = 181,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{EGEN \text{ FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{TEMP} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{SAMLET} = \sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} + \sigma_{EGEN \text{ FOT}} + \sigma_{TEMP} = 181,4 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 431,4 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{FLYT} = 580 \text{ N/mm}^2.$$

$$\sigma_{FLYT} = 580 \text{ N/mm}^2 \text{ som er tatt fra Smiths anskuelsesdiagram.}$$

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 181,4 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 900-kvalitet er det ikke noen fare for utmatting ved 30 tonn aksellast.

Konklusjon: (C = 0,20 N/mm³, S49, 30 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,461 > 0,30 N/mm²).

- Støttepunkt-kraften er mindre enn kravet for betongsville (115,2 < 150 kN).

3.1.3 Aksellast P = 25 tonn, S54

3.1.3.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 25 \text{ tonn} \sim 250 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 250/2 \text{ kN} = \underline{125 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 125 \text{ kN} = 18,75 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 125 \text{ kN} + 18,75 \text{ kN} = \underline{143,75 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 3.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,20 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

Skinneprofil S54, elastisitetsmodul $E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, treghetsmoment om X-aksen $I_{xx} = 2.073 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 20.730.000}{481 \cdot 0,20}} \text{ mm} = \underline{652 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn 2,36 L, for at ikke nedbøyningen og momentet i skinnen skal influeres av flere aksler.

$2,36L = 2,36 \times 652 \text{ mm} = 1.539 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm}$ og 1.500 mm (avstanden mellom de nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner, henholdsvis nye og gamle).

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene både i to nye og to gamle malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningsene.

Forholdet x/L er 2,18 for $x = 1.420 \text{ mm}$ og 2,30 for 1.500 mm . Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Siden 2,36 L er større enn 1.420 mm, må det regnes med 2 aksler som har denne inbyrdes avstanden. Superposisjonsprinsippet benyttes for å få den maksimale deformasjonen/nedbøyningen av skinnen. Det leddet med cosinus og sinus må regnes ut i radianer. $y_{KS\text{ TOTAL}} = y_{KS}(x = 0) + y_{KS}(x = 1420)$.

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm.

$$y_{KS\text{ TOTAL}} = \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 652} + \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 652} e^{-\frac{1420}{652}} \left(\cos \frac{1420}{652} + \sin \frac{1420}{652} \right)$$

$$y_{KS\text{ TOTAL}} = 1,15 + 0,03 = \underline{1,18 \text{ mm}}$$

For $x = 1.500 \text{ mm}$ blir nedbøyningstillegget på 0,009 mm.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS}L}{4} \quad Nm = \frac{143.750 \cdot 652}{4} \quad Nmm = \underline{23.431 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyesspenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S54, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 276,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{\text{KS}}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{23.431.000}{276.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{84,9 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{\text{KS}} = C_{\text{RES}} y_{\text{KS}} \text{ N/mm}^2 = 0,20 \times 1,18 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,236 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunkt kraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunkt kraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{\text{KS}} = b a p_{\text{KS}} = 481 \times 520 \times 0,236 \text{ N} = \underline{59,0 \text{ kN}}$$

3.1.3.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned} v &= 1,0 \\ k &= 0,2 \\ s &= 0,2 \\ t &= 3 \end{aligned}$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{\text{DYN}} = Q_{\text{KS}} \times d = 143,75 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{230,0 \text{ kN}}$$

$$y_{\text{DYN}} = y_{\text{KS}} \times d = 1,18 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{1,89 \text{ mm}}$$

$$M_{\text{DYN}} = M_{\text{KS}} \times d = 23,431 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{37,490 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = \sigma_{\text{FOT U.K. KS}} \times d = 84,9 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{135,8 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{\text{DYN}} = p_{\text{KS}} \times d = 0,236 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,378 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{\text{DYN}} = S_{\text{KS}} \times d = 59,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{94,4 \text{ kN}}$$

3.1.3.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

Bruddspenningen $\sigma_{BRUDD} = 1180 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} = 84,9 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = 135,8 \text{ N/mm}^2$

Egenspenning for senter skinnefot er: $\sigma_{EGEN \text{ FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

Temperaturspenning: $\sigma_{TEMP} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$\sigma_{SAMLET} = \sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} + \sigma_{EGEN \text{ FOT}} + \sigma_{TEMP} = 135,8 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 385,8 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 135,8 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 25 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,20 N/mm³, S54, 25 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville ($0,378 > 0,30 \text{ N/mm}^2$).
- Støttepunktraften er mindre enn kravet for betongsville ($94,4 < 150 \text{ kN}$).

3.1.4 Aksellast P = 30 tonn, S54

3.1.4.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 30 \text{ tonn} \sim 300 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 300/2 \text{ kN} = \underline{150 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 150 \text{ kN} = 22,50 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 150 \text{ kN} + 22,50 \text{ kN} = \underline{172,50 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 3.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,20 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

For beskrivelse av grunnverdi L henvises det til kap. 3.1.3.1.

$$L = \underline{652 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn $2,36 L$, for at ikke nedbøyningen og momentet i skinnen skal influeres av flere aksler.

$2,36L = 2,36 \times 652 \text{ mm} = 1.539 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm}$ og 1.500 mm (avstanden mellom de nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner, henholdsvis nye og gamle).

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene både i to nye og to gamle malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningen.

Forholdet x/L er 2,18 for $x = 1.420$ mm og 2,30 for 1.500 mm. Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Siden $2,36 L$ er større enn 1.420 mm, må det regnes med 2 aksler som har denne inbyrdes avstanden. Superposisjonsprinsippet benyttes for å få den maksimale deformasjonen/nedbøyningen av skinnen. Det leddet med cosinus og sinus må regnes ut i radianer. $y_{KS\ TOTAL} = y_{KS}(x = 0) + y_{KS}(x = 1420)$.

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm.

$$y_{KS\ TOTAL} = \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 652} + \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 652} e^{-\frac{1420}{652}} \left(\cos \frac{1420}{652} + \sin \frac{1420}{652} \right)$$

$$y_{KS\ TOTAL} = 1,38 + 0,04 = \underline{1,42 \text{ mm}}$$

For $x = 1.500$ mm blir nedbøyningstillegget på 0,011 mm.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS} L}{4} \text{ Nm} = \frac{172.500 \cdot 652}{4} \text{ Nmm} = \underline{28.118 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S54, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 276,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = \frac{M_{KS}}{W_{FOT}} \text{ N/mm}^2 = \frac{28.118.000}{276.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{101,9 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{RES} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,20 \times 1,42 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,284 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktkraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktkraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,284 \text{ N} = \underline{71,0 \text{ kN}}$$

3.1.4.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned} v &= 1,0 \\ k &= 0,2 \\ s &= 0,2 \\ t &= 3 \end{aligned}$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 172,50 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{276,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 1,42 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{2,27 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 28,118 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{44,989 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = \sigma_{FOT\ U.K.\ KS} \times d = 101,9 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{163,0 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,284 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,454 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 71,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{113,6 \text{ kN}}$$

3.1.4.3 SkinnespenningerSkinnespenninger for senter skinnefot:

Bruddspenningen $\sigma_{\text{BRUDD}} = 1180 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = 101,9 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = 163,0 \text{ N/mm}^2$

Egenspenning for senter skinnefot er: $\sigma_{\text{EGEN FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

Temperaturspenning: $\sigma_{\text{TEMP}} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$\sigma_{\text{SAMLET}} = \sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} + \sigma_{\text{EGEN FOT}} + \sigma_{\text{TEMP}} = 163,0 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 =$
 $413,0 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2.$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2.$

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 163,0 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 30 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,20 N/mm³, S54, 30 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville ($0,454 > 0,30 \text{ N/mm}^2$).
- Støttepunktraften er mindre enn kravet for betongsville ($113,6 < 150 \text{ kN}$).

3.1.5 Aksellast P = 25 tonn, UIC60

3.1.5.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 25 \text{ tonn} \sim 250 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 250/2 \text{ kN} = \underline{125 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 125 \text{ kN} = 18,75 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 125 \text{ kN} + 18,75 \text{ kN} = \underline{143,75 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 3.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,20 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

Skinneprofil UIC60, elastisitetsmodul $E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,
treghetsmoment om X-aksen $I_{xx} = 3.055 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 30.550.000}{481 \cdot 0,20}} \text{ mm} = \underline{719 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn $2,36 L$, for at ikke nedbøyningen og momentet i skinnen skal influeres av flere aksler.

$2,36L = 2,36 \times 719 \text{ mm} = 1.697 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm}$ og 1.500 mm (avstanden mellom de nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner, henholdsvis nye og gamle).

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene både i to nye og to gamle malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningene.

Forholdet x/L er 1,98 for $x = 1.420$ mm og 2,09 for 1.500 mm. Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Siden $2,36 L$ er større enn 1.420 mm, må det regnes med 2 aksler som har denne inbyrdes avstanden. Superposisjonsprinsippet benyttes for å få den maksimale deformasjonen/nedbøyningen av skinnen. Det leddet med cosinus og sinus må regnes ut i radianer. $y_{KS\ TOTAL} = y_{KS}(x = 0) + y_{KS}(x = 1420)$.

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm.

$$y_{KS\ TOTAL} = \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 719} + \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 719} e^{-\frac{1420}{719}} \left(\cos \frac{1420}{719} + \sin \frac{1420}{719} \right)$$

$$y_{KS\ TOTAL} = 1,04 + 0,08 = \underline{1,12 \text{ mm}}$$

For $x = 1.500$ mm blir nedbøyningstillegget på 0,05 mm.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS} L}{4} \text{ Nm} = \frac{143.750 \cdot 719}{4} \text{ Nmm} = \underline{25.839 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyesspenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil UIC60, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 377,4 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = \frac{M_{KS}}{W_{FOT}} \text{ N/mm}^2 = \frac{25.839.000}{377.400} \text{ N/mm}^2 = \underline{68,5 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{RES} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,20 \times 1,12 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,224 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktkraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktkraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,224 \text{ N} = \underline{56,0 \text{ kN}}$$

3.1.5.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$v = 1,0$$

$$k = 0,2$$

$$s = 0,2$$

$$t = 3$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 143,75 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{230,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 1,12 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{1,79 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 25,839 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{41,342 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = \sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} \times d = 68,5 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{109,6 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,224 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,358 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 56,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{89,6 \text{ kN}}$$

3.1.5.3 SkinnespenningerSkinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{\text{BRUDD}} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = 68,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = 109,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{\text{EGEN FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{\text{TEMP}} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{\text{SAMLET}} = \sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} + \sigma_{\text{EGEN FOT}} + \sigma_{\text{TEMP}} = 109,6 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 359,6 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2.$$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 109,6 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 25 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,20 N/mm³, UIC60, 25 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,358 > 0,30 N/mm²).
- Støttepunktraften er mindre enn kravet for betongsville (89,6 < 150 kN).

3.1.6 Aksellast P = 30 tonn, UIC60

3.1.6.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 30 \text{ tonn} \sim 300 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 300/2 \text{ kN} = \underline{150 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 150 \text{ kN} = 22,50 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 150 \text{ kN} + 22,50 \text{ kN} = \underline{172,50 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 3.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,20 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

For beskrivelse av grunnverdi L henvises det til kap. 3.1.5.1.

$$L = \underline{719 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn $2,36 L$, for at ikke nedbøyningen og momentet i skinnen skal influeres av flere aksler.

$2,36L = 2,36 \times 719 \text{ mm} = 1.697 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm}$ og 1.500 mm (avstanden mellom de nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner, henholdsvis nye og gamle).

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene både i to nye og to gamle malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningene.

Forholdet x/L er 1,98 for $x = 1.420$ mm og 2,09 for 1.500 mm. Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Siden $2,36 L$ er større enn 1.420 mm, må det regnes med 2 aksler som har denne inbyrdes avstanden. Superposisjonsprinsippet benyttes for å få den maksimale deformasjonen/nedbøyningen av skinnen. Det leddet med cosinus og sinus må regnes ut i radianer. $y_{KS\ TOTAL} = y_{KS}(x = 0) + y_{KS}(x = 1420)$.

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm.

$$y_{KS\ TOTAL} = \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 719} + \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,20 \cdot 719} e^{-\frac{1420}{719}} \left(\cos \frac{1420}{719} + \sin \frac{1420}{719} \right)$$

$$y_{KS\ TOTAL} = 1,25 + 0,09 = \underline{1,34 \text{ mm}}$$

For $x = 1.500$ mm blir nedbøyningstillegget på 0,06 mm.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS} L}{4} \text{ Nm} = \frac{172.500 \cdot 719}{4} \text{ Nmm} = \underline{31.007 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyesspenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil UIC60, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 377,4 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = \frac{M_{KS}}{W_{FOT}} \text{ N/mm}^2 = \frac{31.007.000}{377.400} \text{ N/mm}^2 = \underline{82,2 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{RES} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,20 \times 1,34 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,268 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunkt kraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunkt kraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,268 \text{ N} = \underline{67,0 \text{ kN}}$$

3.1.6.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$v = 1,0$$

$$k = 0,2$$

$$s = 0,2$$

$$t = 3$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 172,50 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{276,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 1,34 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{2,14 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 31,007 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{49,611 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = \sigma_{FOT\ U.K.\ KS} \times d = 82,2 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{131,5 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,268 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,429 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 67,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{107,2 \text{ kN}}$$

3.1.6.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{BRUDD} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = 82,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = 131,5 \text{ N/mm}^2$$

Egenspenning for senter skinnefot er: $\sigma_{\text{EGEN FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$

Bruker en temperaturendring på $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Temperaturspenning: $\sigma_{\text{TEMP}} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{\text{SAMLET}} = \sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} + \sigma_{\text{EGEN FOT}} + \sigma_{\text{TEMP}} = 131,5 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 381,5 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2.$$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 131,5 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 30 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,20 N/mm³, UIC60, 30 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville ($0,429 > 0,30 \text{ N/mm}^2$).
- Støttepunkt kraften er mindre enn kravet for betongsville ($107,2 < 150 \text{ kN}$).

3.1.7 Sammenstilling av resultater for beregninger med $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$

I figur 3.1.7.i er beregningsresultatene med ballastsiffer $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$ vist.

		S49		S54		UIC60	
		25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
K V A S I S T A T I S K	Q_0 (kN)	125	150	125	150	125	150
	Q_{KS} (kN)	143,75	172,50	143,75	172,50	143,75	172,50
	y_{KS} (mm)	1,20	1,44	1,18	1,42	1,12	1,34
	M_{KS} (10^5 Nmm)	22,677	27,212	23,431	28,118	25,839	31,007
	$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}}$ (N/mm^2)	94,5	113,4	84,9	101,9	68,5	82,2
	p_{KS} (N/mm^2)	0,240	0,288	0,236	0,284	0,224	0,268
	S_{KS} (kN)	60,0	72,0	59,0	71,0	56,0	67,0
	D Y N A M I S K	Q_{DYN} (kN)	230	276	230	276	230
y_{DYN} (mm)		1,92	2,30	1,89	2,27	1,79	2,14
M_{DYN} (10^6 Nmm)		36,283	43,539	37,490	44,989	41,342	49,611
$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}}$ (N/mm^2)		150,2	181,4	135,8	163,0	109,6	131,5
p_{DYN} (N/mm^2)		0,384	0,461	0,378	0,454	0,358	0,429
$p_{\text{DYN BET. SVILLE}}$ (N/mm^2)		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
S_{DYN} (kN)		96,0	115,2	94,4	113,6	89,6	107,2
$S_{\text{DYN BET. SVILLE}}$ (kN)		150	150	150	150	150	150
$\sigma_{\text{FOT U.K. SAMLET}}$ (N/mm^2)	400,2	431,4	385,8	413,0	359,6	381,5	

Figur 3.1.7.i

3.1.8 Kontroll av kvasistatiske- og dynamiske spenninger

Når det gjelder kravene til kvasistatiske- og dynamiske spenninger se kap. 2.1.8.

I figur 3.1.8.i vises opprettede kvasistatiske og dynamiske skinnespenninger i senter underkant fot i forhold til de justerte, erfaringsmessige grenseverdier.

Mørklagte ruter betyr at verdiene overskrider kravene.

		S49		S54		UIC60	
		25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
K S	Krav 900 (N/mm ²)	88,0	88,0				
	Krav 1200 (N/mm ²)			118,0	118,0	118,0	118,0
	Krav 1400 (N/mm ²)					138,0	138,0
	$\sigma_{\text{FOTLUK KS}}$ (N/mm ²)	94,5	113,4	84,9	101,9	68,5	82,2
D Y N	Krav 900 (N/mm ²)	140,8	140,8				
	Krav 1200 (N/mm ²)			188,8	188,8	153,4	153,4
	Krav 1400 (N/mm ²)					179,4	179,4
	$\sigma_{\text{FOTLUK DYN}}$ (N/mm ²)	150,2	181,4	135,8	163,0	109,6	131,5

Figur 3.1.8.i

Konklusjon:

- Kravet til kvasistatiske og dynamiske skinnespenninger utfra levetids- og økonomiske vurderinger, overskrides for S49 (900-kvalitet) både ved en aksellast på 25 tonn og 30 tonn.
- Ingen overskridelser av anbefalte grenser ved andre skinne-/lastkombinasjoner.

3.2 KOMBINASJON AV HORIZONTAL OG VERTIKALE KREFTER Y/Q

3.2.1 Horisontale/laterale krefter Y

For beskrivelse av horisontale/laterale krefter Y henvises det til kap. 2.2.1. med underkapittel.

3.2.2 Skinnespenninger for S49, P = 25 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil S49
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{\text{DYN}} = 230 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{\text{DYN}}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{\text{TEMP}} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrepunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{\text{DYN}} = 230 \text{ kN}$ er vist i figur 3.2.2.i.

$(Y/Q)_{\text{DYN}}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
σ_{HODE}	122,4	188,3	254,2	320,1	386,0	451,9	517,8	583,7	649,6	715,5
σ_{FOT}	344,2	374,7	405,3	435,8	466,3	496,9	527,4	557,9	588,5	619,0
$\sigma_{\text{EGEN HODE}}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{\text{EGEN FOT}}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{\text{SAMLET HODE YTTERST}}$	212,4	278,3	344,2	410,1	476,0	541,9	607,8	673,7	739,6	805,5
$\sigma_{\text{SAMLET FOT YTTERST}}$	414,2	444,7	475,3	505,8	536,3	566,9	597,4	627,9	658,5	689,0

Figur 3.2.2.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 7.

3.2.3 Skinnespenninger for S49, P = 30 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil S49
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{\text{DYN}} = 276 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{\text{DYN}}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{\text{TEMP}} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{\text{DYN}} = 276 \text{ kN}$ er vist i figur 3.2.3.i.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider bruddspenningen.

$(Y/Q)_{\text{DYN}}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
σ_{HODE}	146,8	225,9	305,0	384,1	463,2	542,3	621,4	700,5	779,6	858,6
σ_{FOT}	413,0	449,7	486,3	523,0	559,6	596,2	632,9	669,5	706,2	742,8
$\sigma_{\text{EGEN HODE}}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{\text{EGEN FOT}}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{\text{SAMLET HODE YTTERST}}$	236,8	315,9	395,0	474,1	553,2	632,3	711,4	790,5	869,6	948,6
$\sigma_{\text{SAMLET FOT YTTERST}}$	483,0	519,7	556,3	593,0	629,6	666,2	702,9	739,5	776,2	812,8

Figur 3.2.3.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 8.

3.2.4 Skinnespenninger for S54, P = 25 tonnForutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil S54
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{\text{DYN}} = 230 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{\text{DYN}}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{\text{TEMP}} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{\text{DYN}} = 230 \text{ kN}$ er vist i figur 3.2.4.i.

Den største spenningen på skinnehodet er på den siden hvor lasten blir påført aksellast på 25 tonn. Et negativt tall angir at det er trykkspenninger.

$(Y/Q)_{\text{DYN}}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
σ_{HODE}	-35,3	-93,9	-152,4	-210,9	-269,5	-328,0	-386,6	-445,1	-503,6	-562,2
σ_{FOT}	306,5	332,9	359,2	385,6	412,0	438,3	464,7	491,1	517,4	543,8
$\sigma_{\text{EGEN HODE}}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{\text{EGEN FOT}}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{\text{SAMLET HODE INNERST}}$	-205,3	-263,9	-322,4	-380,9	-439,5	-498,0	-556,6	-615,1	-673,6	-732,2
$\sigma_{\text{SAMLET FOT YTTERST}}$	376,5	402,9	429,2	455,6	482,0	508,3	534,7	561,1	587,4	613,8

Figur 3.2.4.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q -forholdet er vist i appendiks 9.

3.2.5 Skinnespenninger for S54, P = 30 tonnForutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinnprofil S54
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnhodet med konstant vertikalkraft $Q_{\text{DYN}} = 276 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{\text{DYN}}$ som angriper skinnhodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnhode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{\text{TEMP}} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{\text{DYN}} = 276 \text{ kN}$ er vist i figur 3.2.5.i.

$(Y/Q)_{\text{DYN}}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
σ_{HODE}	135,7	205,9	276,2	346,4	416,7	486,9	557,2	627,4	697,7	767,9
σ_{FOT}	367,8	399,4	431,1	462,7	494,3	526,0	557,6	589,3	620,9	652,5
$\sigma_{\text{EGEN HODE}}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{\text{EGEN FOT}}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{\text{SAMLET HODE YTTERST}}$	225,7	295,9	366,2	436,4	506,7	576,9	647,2	717,4	787,7	857,9
$\sigma_{\text{SAMLET FOT YTTERST}}$	437,8	469,4	501,1	532,7	564,3	596,0	627,6	659,3	690,9	722,5

Figur 3.2.5.i

Skinnespenningerne som funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 10.

3.2.6 Skinnespenninger for UIC60, P = 25 tonnForutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinnprofil UIC60
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$

- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 230$ kN
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra 0,3 - 1,2 x Q_{DYN} som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : -40,0 N/mm²
 - Skinnefot : -60,0 N/mm²
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0$ N/mm²

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrepunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 230$ kN er vist i figur 3.2.6.i.

Den største spenningen på skinnehodet er den på siden hvor lasten blir påført for aksellast på 25 tonn. Et negativt tall angir at det er trykkspenninger.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
σ_{HODE}	-43,2	-111,4	-179,6	-247,7	-315,9	-384,1	-452,2	-520,4	-588,6	-656,7
σ_{FOT}	247,6	261,4	275,1	288,9	302,7	316,4	330,2	343,9	357,7	371,4
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE INNERST}$	-213,2	-281,4	-349,6	-417,7	-485,9	-554,1	-622,2	-690,4	-758,6	-826,7
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	317,6	331,4	345,1	358,9	372,7	386,4	400,2	413,9	427,7	441,4

Figur 3.2.6.i

Skinnespenningene som funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 11.

3.2.7 Skinnespenninger for UIC60, P = 30 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,20$ N/mm³ (Antatt)
- Skinneprofil UIC60
- Hastighet $V = 50$ km/h
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 276$ kN

- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra 0,3 - 1,2 x Q_{DYN} som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : -40,0 N/mm²
 - Skinnefot : -60,0 N/mm²
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0$ N/mm²

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 276$ kN er vist i figur 3.2.7.i.

Den største spenningen på skinnehodet er på den siden hvor lasten blir påført for aksellast på 30 tonn. Et negativt tall angir at det er trykkspenninger.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
σ_{HODE}	-51,9	-133,7	-215,5	-297,3	-379,1	-460,9	-542,7	-624,5	-706,3	-788,1
σ_{FOT}	297,2	313,7	330,2	346,7	363,2	379,7	396,2	412,7	429,2	445,7
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE INNERST}$	-221,9	-303,7	-385,5	-467,3	-549,1	-630,9	-712,7	-794,5	-876,3	-958,1
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	367,2	383,7	400,2	416,7	433,2	449,7	466,2	482,7	499,2	515,7

Figur 3.2.7.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 12.

3.2.8 Vurdering av de dynamiske kreftene fra boggikonstruksjon

De teoretiske vurderingene av de dynamiske kreftene fra boggikonstruksjonen henvises til kap. 2.2.8. Spenningene beregnet med $d = 1,45$ sammenlignes med de beregningene som ble gjort tidligere med $k = 0,2$ både for 25 tonns og 30 tonns aksellast og er vist i figur 3.2.8.i.

		Q_{DYN} (kN)	y_{DYN} (mm)	M_{DYN} (10^6 Nmm)	$\sigma_{FORLIK DYN}$ (N/mm ²)	P_{DYN} (N/mm ²)	S_{DYN} (kN)	$\sigma_{FOT SAMLET}$ (N/mm ²)
S 4 9	25 t (k=0,2)	230	1,92	36,283	150,2	0,384	96,0	400,2
	30 t (k=0,2)	276	2,30	43,539	181,4	0,461	115,2	431,4
	30 t (k=0,15)	250	2,09	39,457	164,4	0,418	104,4	414,4
S 5 4	25 t (k=0,2)	230	1,89	37,490	135,8	0,378	94,4	385,8
	30 t (k=0,2)	276	2,27	44,989	163,0	0,454	113,6	413,0
	30 t (k=0,15)	250	2,06	40,771	147,8	0,412	103,0	397,8
U I C 6 0	25 t (k=0,2)	230	1,79	41,342	109,6	0,358	89,6	359,6
	30 t (k=0,2)	276	2,14	49,611	131,5	0,429	107,2	381,5
	30 t (k=0,15)	250	1,94	44,960	119,2	0,389	97,2	369,2

Figur 3.2.8.i

De horisontale kreftene og skinnespenningene i hjørnene blir da endret siden sporstandarden forandres.

I figur 3.2.8.ii er skinnespenningene for k = 0,15 og P = 30 tonn beregnet.

Et negativt tall angir at det er trykkspenninger.

		$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
S49	Y_{DYN} (kN) k=0,15		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{SAMLET HOEDE YTT.}$		223,1	294,7	366,4	438,1	509,8	581,4	653,1	724,8	796,5	868,1
	$\sigma_{SAMLET FOT YTT.}$		444,3	477,5	510,7	543,9	577,1	610,4	643,6	676,8	710,0	743,2
S54	Y_{DYN} (kN) k=0,15		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{SAMLET HOEDE YTT.}$		213,0	276,6	340,3	403,9	467,6	531,3	594,9	658,6	722,3	785,9
	$\sigma_{SAMLET FOT YTT.}$		403,3	432,0	460,6	489,3	518,0	546,7	575,3	604,0	632,7	661,4
UIC60	Y_{DYN} (kN) k=0,15		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{SAMLET HOEDE INN.}$		-217,0	-291,2	-365,3	-439,4	-513,5	-587,7	-661,8	-735,9	-810,1	-884,2
	$\sigma_{SAMLET FOT YTT.}$		339,3	354,3	369,2	372,7	399,1	414,1	429,1	444,0	459,0	473,9

Figur 3.2.8.ii

3.3 SAMMENDRAG FOR BEREGNINGER MED $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$

For disse tre skinneprofilene er det flere felles parametre. De kan kort nevnes slik:

- Kvasistatisk tillegg (15 %)
- Langsvillebredde $b = 481 \text{ mm}$
- Svillleavstand $a = 520 \text{ mm}$
- Ballastsiffer $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$
- Hastighetsavhengig faktor $v = 1,0$
- Sporstandard $k = 0,2$
- Statistisk sikkerhet $t = 3$
- Hjulradien på godsvognene $r = 490 \text{ mm}$

Grunnverdi L er avhengig av skinneprofilenes treghetsmoment om X -aksen.

Resultatene for beregningene i kvasistatisk og dynamisk tilstand for S49, S54 og UIC60 er sammenstilt i figur 3.3.i og den viser forskjellene i spenningene, kreftene og nedbøyningen.

		S49		S54		UIC60	
		25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
K V A S I S T A T I S K	Q_0 (kN)	125	150	125	150	125	150
	Q_{KS} (kN)	143,75	172,50	143,75	172,50	143,75	172,50
	y_{KS} (mm)	1,20	1,44	1,18	1,42	1,12	1,34
	M_{KS} (10^6 Nmm)	22,677	27,212	23,431	28,118	25,839	31,007
	$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}}$ (N/mm^2)	94,5	113,4	84,9	101,9	68,5	82,2
	p_{KS} (N/mm^2)	0,240	0,288	0,236	0,284	0,224	0,268
	S_{KS} (kN)	60,0	72,0	59,0	71,0	56,0	67,0
	D Y N A M I S K	Q_{DYN} (kN)	230	276	230	276	230
y_{DYN} (mm)		1,92	2,30	1,89	2,27	1,79	2,14
M_{DYN} (10^6 Nmm)		36,283	43,539	37,490	44,989	41,342	49,611
$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}}$ (N/mm^2)		150,2	181,4	135,8	163,0	109,6	131,5
p_{DYN} (N/mm^2)		0,384	0,461	0,378	0,454	0,358	0,429
$p_{\text{DYN RET. SVILLE}}$ (N/mm^2)		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
S_{DYN} (kN)		96,0	115,2	94,4	113,6	89,6	107,2
$S_{\text{DYN RET. SVILLE}}$ (kN)		150	150	150	150	150	150
	$\sigma_{\text{FOT U.K. SAMLET}}$ (N/mm^2)	400,2	431,4	385,8	413,0	359,6	381,5

Figur 3.3.i

Det er resultatene for de dynamiske tilstandene som er av størst interesse i denne sammenhengen. I tillegg til de samme parametrene som ovenfor kommer spenningene i hjørnene på skinnene inn. De er avhengige av den horisontale kraften, som igjen er avhengig av forholdet mellom de vertikale og de horisontale kreftene, som påføres skinnene av malmvognene. I figur 3.3.ii vises ekstremverdiene.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider bruddspenningen.

		$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
S49	Y_{DYN} 25t	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276	
	$\sigma_{HODE\ YTT.}$	212,4	278,3	344,2	410,1	476,0	541,9	607,8	673,7	739,6	805,5	
	$\sigma_{BRUDD} = \sigma_{FOT\ YTT.}$	414,2	444,7	475,3	505,8	536,3	566,9	597,4	627,9	658,5	689,0	
880 N/mm ²	Y_{DYN} 30t	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331	
	$\sigma_{HODE\ YTT.}$	236,8	315,9	395,0	474,1	553,2	632,3	711,4	790,5	869,6	948,6	
	$\sigma_{FOT\ YTT.}$	483,0	519,7	556,3	593,0	629,6	666,2	702,9	739,5	776,2	812,8	
S54	Y_{DYN} 25t	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276	
	$\sigma_{HODE\ INN.}$	-205,3	-263,9	-322,4	-380,9	-439,5	-498,0	-556,6	-615,1	-673,6	-732,2	
	$\sigma_{BRUDD} = \sigma_{FOT\ YTT.}$	376,5	402,9	429,2	455,6	482,0	508,3	534,7	561,1	587,4	613,8	
1180 N/mm ²	Y_{DYN} 30t	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331	
	$\sigma_{HODE\ YTT.}$	225,7	295,9	366,2	436,4	506,7	576,9	647,2	717,4	787,7	857,9	
	$\sigma_{FOT\ YTT.}$	437,8	469,4	501,1	532,7	564,3	596,0	627,6	659,3	690,9	722,5	
UIC60	Y_{DYN} 25t	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276	
	$\sigma_{HODE\ INN.}$	-213,2	-281,4	-349,6	-417,7	-485,9	-554,1	-622,2	-690,4	-758,6	-826,7	
	$\sigma_{BRUDD} = \sigma_{FOT\ YTT.}$	317,6	331,4	345,1	358,9	372,7	386,4	400,2	413,9	427,7	441,4	
1180 N/mm ²	Y_{DYN} 30t	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331	
	$\sigma_{HODE\ INN.}$	-221,9	-303,7	-385,5	-467,3	-549,1	-630,9	-712,7	-794,5	-876,3	-958,1	
	$\sigma_{FOT\ YTT.}$	367,2	383,7	400,2	416,7	433,2	449,7	466,2	482,7	499,2	515,7	

Figur 3.3.ii

Spenningene i skinnhodet ved 30 tonn blir større for UIC60 enn for S49 når $(Y/Q)_{DYN} \geq 0,9$ og for S54 når $(Y/Q)_{DYN} \geq 0,4$. Ved sammenligning av S49 og S54 ved 30 tonn er skinnespenningene større i S49 enn S54 ved alle Y/Q-forhold. Både S54 og UIC60 har en bruddgrense på 1180 N/mm², mens S49 har en bruddgrense på 880 N/mm². I tillegg kan UIC60 ha en bruddgrense på 1380 N/mm².

I beregningene som er utført, har det dynamiske lasttillegget den samme %-andelen for både 25 tonn og 30 tonn (60 %). Hvis man ikke skal øke det dynamiske lasttillegget, som man har på Ofotbanen idag, men beholde det også for 30 tonn, må man redusere %-andelen på lasttillegget fra 30 tonn fra 60 % til 50 %. Dette kan bare oppnås ved å bedre sporstandarden. Ved å senke k fra 0,2 til 0,15 vil lasttillegget bli redusert fra 60 % til 45 % [se figur 3.3.iii]. Grenseverdien for tillatt trafikkspenning med tanke på utmatting er for 900-kvalitet 185 N/mm² i underkant senter skinnefot. Ved en høyere stålqualität (1200) vil denne grenseverdien øke med 20 - 30 %. Det skulle derfor ikke værre fare for utmatting av skinnene.

		Q_{DYN} (kN)	y_{DYN} (mm)	M_{DYN} (10 ⁵ Nmm)	$\sigma_{FORLIK DYN}$ (N/mm ²)	P_{DYN} (N/mm ²)	S_{DYN} (kN)	$\sigma_{FOT SAMLET}$ (N/mm ²)
S 4 9	25 t (k=0,2)	230	1,92	36,283	150,2	0,384	96,0	400,2
	30 t (k=0,2)	276	2,30	43,539	181,4	0,461	115,2	431,4
	30 t (k=0,15)	250	2,09	39,457	164,4	0,418	104,4	414,4
S 5 4	25 t (k=0,2)	230	1,89	37,490	135,8	0,378	94,4	385,8
	30 t (k=0,2)	276	2,27	44,989	163,0	0,454	113,6	413,0
	30 t (k=0,15)	250	2,06	40,771	147,8	0,412	103,0	397,8
U 1 C 6 0	25 t (k=0,2)	230	1,79	41,342	109,6	0,358	89,6	359,6
	30 t (k=0,2)	276	2,14	49,611	131,5	0,429	107,2	381,5
	30 t (k=0,15)	250	1,94	44,960	119,2	0,389	97,2	369,2

Figur 3.3.iii

Figur 3.3.iv viser at ved å bedre sporstandarden, reduseres de horisontale kreftene og skinnespenningene.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider bruddspenningen.

		(Y/Q) _{DYN}	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
S49	$Y_{DYN} k = 0,2$		82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
	$\sigma_{HODE YTT}$		236,8	315,9	395,0	474,1	553,2	632,3	711,4	790,5	869,6	948,6
	$\sigma_{FOT YTT}$		483,0	519,7	556,3	593,0	629,6	666,2	702,9	739,5	776,2	812,8
880	$Y_{DYN} k = 0,15$		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{HODE YTT}$		223,1	294,7	366,4	438,1	509,8	581,4	653,1	724,8	796,5	868,1
	$\sigma_{FOT YTT}$		444,3	477,5	510,7	543,9	577,1	610,4	643,6	676,8	710,0	743,2
S54	$Y_{DYN} k = 0,2$		82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
	$\sigma_{HODE YTT}$		225,7	295,9	366,2	436,4	506,7	576,9	647,2	717,4	787,7	857,9
	$\sigma_{FOT YTT}$		437,8	469,4	501,1	532,7	564,3	596,0	627,6	659,3	690,9	722,5
1180	$Y_{DYN} k = 0,15$		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{HODE YTT}$		213,0	276,6	340,3	403,9	467,6	531,3	594,9	658,6	722,3	785,9
	$\sigma_{FOT YTT}$		403,3	432,0	460,6	489,3	518,0	546,7	575,3	604,0	632,7	661,4
UIC60	$Y_{DYN} k = 0,2$		82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
	$\sigma_{HODE INN}$		-221,9	-303,7	-385,5	-467,3	-549,1	-630,9	-712,7	-794,5	-876,3	-958,1
	$\sigma_{FOT YTT}$		367,2	383,7	400,2	416,7	433,2	449,7	466,2	482,7	499,2	515,7
1180	$Y_{DYN} k = 0,15$		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{HODE INN}$		-217,0	-291,2	-365,3	-439,4	-513,5	-587,7	-661,8	-735,9	-810,1	-884,2
	$\sigma_{FOT YTT}$		339,3	354,3	369,2	384,2	399,1	414,1	429,1	444,0	459,0	473,9

Figur 3.3.iv

3.4 KONKLUSJON FOR BALLASTSIFTER C = 0,20 N/MM³

Det vil ikke være noen fare for utmattingsbrudd i S49, S54 eller UIC60 ved en aksellastøkning fra 25 til 30 tonn, men når ballastsifferet senkes fra 0,30 til 0,20 N/mm³ øker faren for utmattingsbrudd i henhold til skinnespenninger i senter underkant fot, med ca. 10 % for alle skinneprofil.

Skinnespenningen er imidlertid godt under grenseverdien på 185 N/mm^2 bortsett fra S49 med 30 tonn.

De kvasistatiske og dynamiske skinnespenningene vil derimot ved både 25 og 30 tonn overstige de justerte, tyske erfaringsmessige grenseverdiene for spenningspotensialet i en skinne ved brudd for S49. Dette viser igjen at sporvekslene med S49 bør skiftes ut.

Konklusjonen blir da at man kan beholde S54 (1200-kvalitet) ved $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$, selv om aksellasten øker fra 25 til 30 tonn med hensyn til skinnespenninger og utmatting, men sporvekslene bør byttes ut med et større skinneprofil og høyere stålqualität.

4. BEREGNING MED BALLASTSIFFER $C = 0,15$ N/mm^3

4.1 VERTIKALE KREFTER Q

4.1.1 Aksellast P = 25 tonn, S49

4.1.1.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

P = 25 tonn ~ 250 kN

Vertikal hjullast:

$Q_0 = P/2 = 250/2 \text{ kN} = \underline{125 \text{ kN}}$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 125 \text{ kN} = 18,75 \text{ kN}$

Kvasistatisk kraft:

$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 125 \text{ kN} + 18,75 \text{ kN} = \underline{143,75 \text{ kN}}$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

Langsvillebredde: b = 481 mm

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises til kap. 2.1.1.1. og kap. 3.1.1.1.

Derfor foretas også skinnespenningsberegninger med en enda lavere C-verdi enn $0,20 N/mm^3$.

$C_{RES} = \underline{0,15 N/mm^3}$

Grunnverdi L:

Skinneprofil S49, elastisitetsmodul $E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, treghetsmoment om X-aksen $I_{xx} = 1.819 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 18.190.000}{481 \cdot 0,15}} \text{ mm} = \underline{678 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn $2,36 L$, for at ikke nedbøyningen og momentet i skinnen skal influeres av flere aksler.

$2,36L = 2,36 \times 678 \text{ mm} = 1.600 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm}$ og 1.500 mm (avstanden mellom de nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner, henholdsvis nye og gamle).

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene både i to nye og to gamle malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningene.

Forholdet x/L er 2,09 for $x = 1.420 \text{ mm}$ og 2,21 for 1.500 mm . Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Siden $2,36 L$ er større enn 1.420 mm , må det regnes med 2 aksler som har denne inbyrdes avstanden. Superposisjonsprinsippet benyttes for å få den maksimale deformasjonen/nedbøyningen av skinnen. Det leddet med cosinus og sinus må regnes ut i radianer. $y_{KS \text{ TOTAL}} = y_{KS}(x = 0) + y_{KS}(x = 1420)$.

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm .

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 678} + \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 678} e^{-\frac{1420}{678}} \left(\cos \frac{1420}{678} + \sin \frac{1420}{678} \right)$$

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = 1,47 + 0,07 = \underline{1,54 \text{ mm}}$$

For $x = 1.500 \text{ mm}$ blir nedbøyningstillegget på $0,03 \text{ mm}$.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS}L}{4} \quad Nm = \frac{143.750 \cdot 678}{4} \quad Nmm = \underline{24.366 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S49, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 240,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} = \frac{M_{KS}}{W_{FOT}} \text{ N/mm}^2 = \frac{24.366.000}{240.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{101,5 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{RES} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,15 \times 1,54 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,231 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktkraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktkraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,231 \text{ N} = \underline{57,8 \text{ kN}}$$

4.1.1.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned} v &= 1,0 \\ k &= 0,2 \\ s &= 0,2 \\ t &= 3 \end{aligned}$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 143,75 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{230,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 1,54 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{2,46 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 24,366 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{38,986 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = \sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} \times d = 101,5 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{162,4 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,231 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,370 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 57,8 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{92,5 \text{ kN}}$$

4.1.1.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{BRUDD} = 880 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. KS}} = 101,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} = 162,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{EGEN \text{ FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{TEMP} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{SAMLET} = \sigma_{FOT \text{ U.K. DYN}} + \sigma_{EGEN \text{ FOT}} + \sigma_{TEMP} = 162,4 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 412,4 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{FLYT} = 580 \text{ N/mm}^2.$$

$$\sigma_{FLYT} = 580 \text{ N/mm}^2 \text{ som er tatt fra Smiths anskuelsesdiagram.}$$

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 162,4 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 900-kvalitet er det ikke noen fare for utmatting ved 25 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,15 N/mm³, S49, 25 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,370 > 0,30 N/mm²).

- Støttepunkt-kraften er mindre enn kravet for betongsville (92,5 < 150 kN).

4.1.2 Aksellast P = 30 tonn, S49

4.1.2.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 30 \text{ tonn} \sim 300 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 300/2 \text{ kN} = \underline{150 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 150 \text{ kN} = 22,50 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{\text{KS}} = Q_0 + \Delta Q = 150 \text{ kN} + 22,50 \text{ kN} = \underline{172,50 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 4.1.1.1.

$$C_{\text{RES}} = \underline{0,15 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

For beskrivelse av grunnverdi L henvises det til kap. 4.1.1.1.

$$L = \underline{678 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn 2,36 L, for at ikke nedbøyningen og momentet i skinnen skal influeres av flere aksler.

$2,36L = 2,36 \times 678 \text{ mm} = 1.600 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm}$ og 1.500 mm (avstanden mellom de nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner, henholdsvis nye og gamle).

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene både i to nye og to gamle malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningene.

Forholdet x/L er 2,09 for $x = 1.420 \text{ mm}$ og 2,21 for 1.500 mm . Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Siden $2,36 L$ er større enn 1.420 mm , må det regnes med 2 aksler som har denne inbyrdes avstanden. Superposisjonsprinsippet benyttes for å få den maksimale deformasjonen/nedbøyningen av skinnen. Det leddet med cosinus og sinus må regnes ut i radianer. $y_{KS\text{ TOTAL}} = y_{KS}(x = 0) + y_{KS}(x = 1420)$.

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

hvor x i dette tilfellet er 1.420 mm .

$$y_{KS\text{ TOTAL}} = \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 678} + \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 678} e^{-\frac{1420}{678}} \left(\cos \frac{1420}{678} + \sin \frac{1420}{678} \right)$$

$$y_{KS\text{ TOTAL}} = 1,76 + 0,08 = \underline{1,84 \text{ mm}}$$

For $x = 1.500 \text{ mm}$ blir nedbøyningstillegget på $0,04 \text{ mm}$.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS}L}{4} \text{ Nm} = \frac{172.500 \cdot 678}{4} \text{ Nmm} = \underline{29.239 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S49, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 240,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{KS}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{29.239.000}{240.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{121,8 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{RES} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,15 \times 1,84 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,276 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunkt kraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunkt kraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,276 \text{ N} = \underline{69,0 \text{ kN}}$$

4.1.2.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$v = 1,0$$

$$k = 0,2$$

$$s = 0,2$$

$$t = 3$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 172,50 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{276,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 1,84 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{2,94 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 29,239 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{46,782 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = \sigma_{FOT\ U.K.\ KS} \times d = 121,8 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{194,9 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,276 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,442 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 69,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{110,4 \text{ kN}}$$

4.1.2.3 SkinnespenningerSkinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{BRUDD} = 880 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = 121,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = 194,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{\text{EGEN FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{\text{TEMP}} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{\text{SAMLET}} = \sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} + \sigma_{\text{EGEN FOT}} + \sigma_{\text{TEMP}} = 194,9 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 444,9 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{FLYT}} = 580 \text{ N/mm}^2.$$

$\sigma_{\text{FLYT}} = 580 \text{ N/mm}^2$ som er tatt fra Smiths anskuellesdiagram.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 < 194,9 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 900-kvalitet er det stor fare for utmatting ved 30 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,15 N/mm³, S49, 30 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det stor for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,442 > 0,30 N/mm²).
- Støttepunktraften er mindre enn kravet for betongsville (110,4 < 150 kN).

4.1.3 Aksellast P = 25 tonn, S54

4.1.3.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 25 \text{ tonn} \sim 250 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 250/2 \text{ kN} = \underline{125 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 125 \text{ kN} = 18,75 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 125 \text{ kN} + 18,75 \text{ kN} = \underline{143,75 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

Langsvillebredde: $b = \underline{481 \text{ mm}}$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 4.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,15 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

Skinneprofil S54, elastisitetsmodul $E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, treghetsmoment om X-aksen $I_{xx} = 2.073 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 20.730.000}{481 \cdot 0,15}} \text{ mm} = \underline{701 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn $2,36 L$, for at ikke nedbøyningen og momentet i skinnen skal influeres av flere aksler.

$2,36L = 2,36 \times 701 \text{ mm} = 1.654 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm}$ og 1.500 mm (avstanden mellom de nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner, henholdsvis nye og gamle).

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene både i to nye og to gamle malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningene.

Forholdet x/L er 2,03 for $x = 1.420 \text{ mm}$ og 2,14 for 1.500 mm . Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Se 4.1.1.1

$$y_{KS\ TOTAL} = \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 701} + \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 701} e^{-\frac{1420}{701}} \left(\cos \frac{1420}{701} + \sin \frac{1420}{701} \right)$$

$$y_{KS\ TOTAL} = 1,42 + 0,09 = \underline{1,51\text{ mm}}$$

For $x = 1.500\text{ mm}$ blir nedbøyningstillegget på $0,05\text{ mm}$.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS}L}{4} \text{ Nm} = \frac{143.750 \cdot 701}{4} \text{ Nmm} = \underline{25.192 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyespenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S54, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 276,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = \frac{M_{KS}}{W_{FOT}} \text{ N/mm}^2 = \frac{25.192.000}{276.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{91,3 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{RES} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,15 \times 1,51 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,227 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,227 \text{ N} = \underline{56,8 \text{ kN}}$$

4.1.3.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v , sporstandard k , standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$v = 1,0$$

$$k = 0,2$$

$$s = 0,2$$

$$t = 3$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{DYN} = Q_{KS} \times d = 143,75 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{230,0 \text{ kN}}$$

$$y_{DYN} = y_{KS} \times d = 1,51 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{2,42 \text{ mm}}$$

$$M_{DYN} = M_{KS} \times d = 25,192 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{40,307 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = \sigma_{FOT\ U.K.\ KS} \times d = 91,3 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{146,1 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{DYN} = p_{KS} \times d = 0,227 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,363 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{DYN} = S_{KS} \times d = 56,8 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{90,9 \text{ kN}}$$

4.1.3.3 SkinnespenningerSkinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{BRUDD} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = 91,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} = 146,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{EGEN\ FOT} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{TEMP} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{SAMLET} = \sigma_{FOT\ U.K.\ DYN} + \sigma_{EGEN\ FOT} + \sigma_{TEMP} = 146,1 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = \\ 396,1 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2.$$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2/1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 146,1 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 25 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,15 N/mm³, S54, 25 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville ($0,363 > 0,30 \text{ N/mm}^2$).
- Støttepunktraften er mindre enn kravet for betongsville ($90,9 < 150 \text{ kN}$).

4.1.4 Aksellast P = 30 tonn, S54

4.1.4.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 30 \text{ tonn} \sim 300 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 300/2 \text{ kN} = \underline{150 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 150 \text{ kN} = 22,50 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{ks} = Q_0 + \Delta Q = 150 \text{ kN} + 22,50 \text{ kN} = \underline{172,50 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 4.1.1.1.

$$C_{RES} = 0,15 \text{ N/mm}^3$$

Grunnverdi L:

For beskrivelse av grunnverdi L henvises det til kap. 4.1.3.1.

$$L = 701 \text{ mm}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn $2,36 L$, for at ikke nedbøyningen og momentet i skinnen skal influeres av flere aksler.

$2,36L = 2,36 \times 701 \text{ mm} = 1.654 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm}$ og 1.500 mm (avstanden mellom de nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner, henholdsvis nye og gamle).

Det betyr at avstanden mellom de nærmeste akslene både i to nye og to gamle malmvogner blir får liten til at ikke skinnespenningen påvirkes av naboakselen. Aksel nr. 1 vil virke inn på deformasjonen og momentet under aksel nr. 2 og dermed også skinnespenningene.

Forholdet x/L er 2,03 for $x = 1.420 \text{ mm}$ og 2,14 for 1.500 mm . Tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" viser at nedbøyningen vil få et lite pålegg, mens momentet får et fradrag på grunn av naboakselen. Her søkes ugunstigste lasttilfelle som for momentet blir siste aksel i siste vogn i toget.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Se 4.1.1.1

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 701} + \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 701} e^{-\frac{1420}{701}} \left(\cos \frac{1420}{701} + \sin \frac{1420}{701} \right)$$

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = 1,71 + 0,10 = 1,81 \text{ mm}$$

For $x = 1.500 \text{ mm}$ blir nedbøyningstillegget på $0,06 \text{ mm}$.

Moment i skinnen:

I og med at momentet får et fradrag, ser vi bare på skinnespenningen under en enkelt aksel.

$$M_{KS} = \frac{Q_{KS} L}{4} \text{ Nm} = \frac{172.500 \cdot 701}{4} \text{ Nmm} = 30.231 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

Bøyepeningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil S54, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 276,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{\text{KS}}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{30.231.000}{276.000} \text{ N/mm}^2 = \underline{109,5 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{\text{KS}} = C_{\text{RES}} y_{\text{KS}} \text{ N/mm}^2 = 0,15 \times 1,81 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,272 \text{ N/mm}^2}$$

Støttestrekkraften under svillen:

For beskrivelse av støttestrekkraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{\text{KS}} = b a p_{\text{KS}} = 481 \times 520 \times 0,272 \text{ N} = \underline{68,0 \text{ kN}}$$

4.1.4.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned} v &= 1,0 \\ k &= 0,2 \\ s &= 0,2 \\ t &= 3 \end{aligned}$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{\text{DYN}} = Q_{\text{KS}} \times d = 172,50 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{276,0 \text{ kN}}$$

$$y_{\text{DYN}} = y_{\text{KS}} \times d = 1,81 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{2,90 \text{ mm}}$$

$$M_{\text{DYN}} = M_{\text{KS}} \times d = 30,231 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{48,370 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = \sigma_{\text{FOT U.K. KS}} \times d = 109,5 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{175,2 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{\text{DYN}} = p_{\text{KS}} \times d = 0,275 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,435 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{\text{DYN}} = S_{\text{KS}} \times d = 68,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{108,8 \text{ kN}}$$

4.1.4.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

Bruddspenningen $\sigma_{BRUDD} = 1180 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{FOT.U.K.KS} = 109,5 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{FOT.U.K.DYN} = 175,2 \text{ N/mm}^2$

Egenspenning for senter skinnefot er: $\sigma_{EGEN FOT} = 120,0 \text{ N/mm}^2$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

Temperaturspenning: $\sigma_{TEMP} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$\sigma_{SAMLET} = \sigma_{FOT.U.K.DYN} + \sigma_{EGEN FOT} + \sigma_{TEMP} = 175,2 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 425,2 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{FLYT} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 175,2 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 30 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,15 N/mm³, S54, 30 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det liten fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville ($0,435 > 0,30 \text{ N/mm}^2$).
- Støttepunktraften er mindre enn kravet for betongsville ($108,8 < 150 \text{ kN}$).

4.1.5 Aksellast P = 25 tonn, UIC60

4.1.5.1 Kvasistatisk tilstand

Aksellast:

$$P = 25 \text{ tonn} \sim 250 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 250/2 \text{ kN} = \underline{125 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 125 \text{ kN} = 18,75 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{KS} = Q_0 + \Delta Q = 125 \text{ kN} + 18,75 \text{ kN} = \underline{143,75 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\text{Langsvillebredde: } b = \underline{481 \text{ mm}}$$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 4.1.1.1.

$$C_{RES} = \underline{0,15 \text{ N/mm}^3}$$

Grunnverdi L:

Skinneprofil UIC60, elastisitetsmodul $E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,
treghetsmoment om X-aksen $I_{x-x} = 3.055 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210.000 \cdot 30.550.000}{481 \cdot 0,15}} \text{ mm} = \underline{772 \text{ mm}}$$

Avstanden mellom nærmeste aksler må være større enn 2,36 L, for at ikke nedbøyningen og momentet i skinnen skal influeres av flere aksler.

$2,36L = 2,36 \times 772 \text{ mm} = 1.822 \text{ mm} > 1.420 \text{ mm} / 1.500 \text{ mm}$ (avstanden mellom de nærmeste akslene i to sammenkoblede vogner, henholdsvis nye og gamle) og $1.700 \text{ mm} / 1.780 \text{ mm}$ (akselavstanden i gammel og ny boggi).

Det betyr at nedbøyning og moment under aksel nr. 1 i en boggi sett fra vognenden, vil påvirkes både av naboakselen i boggien og nærmeste aksel på neste vogn.

Forholdet x/L er 1,84 for $x = 1.420 \text{ mm}$, 1,94 for $x = 1.500 \text{ mm}$, 2,20 for $x = 1.700 \text{ mm}$ og 2,31 for $x = 1.780 \text{ mm}$.

Forholdene x/L som gjelder gammel/nåværende vogn (1,94 og 2,20), tilsier utfra tabell 4, del II i Fastenrath's "Die Eisenbahnschiene" at nedbøyningen ved aksel nr. 1 vil få et tillegg fra begge naboakslene, mens momentet får et negativt bidrag fra de samme akslene. Det samme gjelder ny vogn med ny boggi hvor x/L er henholdsvis 1,84 og 2,31. Her søkes imidlertid det ugunstigste lasttilfellet som for momentets del, blir under siste aksel i siste vogn i toget.

Ut fra nevnte tabell finnes også at største verdier for nedbøyning og moment i skinnen vil oppstå under den nye vognen. I de videre beregningene sees det derfor bare på dette lasttilfellet.

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

Superposisjonsprinsippet må brukes for å få den maksimale deformasjonen/nedbøyningen av skinnen. Leddet med cosinus og sinus regnes ut i radianer.

$y_{KS \text{ TOTAL}} = y_{KS}(x = 0) + y_{KS}(x = 1.420) + y_{KS}(x = 1.780)$ hvor

$$y_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \text{ mm}$$

og x er avstanden fra akselen hvor nedbøyningen skal beregnes under, og til naboakslene.

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 772} + \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 772} e^{-\frac{1420}{772}} \left(\cos \frac{1420}{772} + \sin \frac{1420}{772} \right) \\ + \frac{143.750}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 772} e^{-\frac{1780}{772}} \left(\cos \frac{1780}{772} + \sin \frac{1780}{772} \right)$$

$$y_{KS \text{ TOTAL}} = 1,29 + 0,14 + 0,01 = \underline{1,44 \text{ mm}}$$

Moment i skinnen:

Superposisjonsprinsippet må også brukes her for å få det maksimale momentet i skinnen. Siden vi ser på siste aksel i toget, influeres momentet bare av aksel nr. 2 i boggien. Leddet med cosinus og sinus regnes ut i radianer.

$$M_{KS\ TOTAL} = M_{KS}(x = 0) + M_{KS}(x = 1780) \text{ hvor}$$

$$M_{KS}(x) = \frac{Q_{KS}L}{4} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L} \right) \text{ Nm}$$

og $x = 1.780$ mm er akselavstanden i boggien.

$$M_{KS\ TOTAL} = \frac{143.750 \cdot 772}{4} + \frac{143.750 \cdot 772}{4} e^{-\frac{1780}{772}} \left(\cos \frac{1780}{772} - \sin \frac{1780}{772} \right) \text{ Nmm}$$

$$M_{KS\ TOTAL} = 27,744 \times 10^6 + (-3,906 \times 10^6) \text{ Nmm} = \underline{23,838 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

Bøyepeningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil UIC60, motstandsmoment om X-aksen $W_{x-x} = 377,4 \times 10^3$ mm³.

$$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS} = \frac{M_{KS}}{W_{FOT}} \text{ N/mm}^2 = \frac{23.838.000}{377.400} \text{ N/mm}^2 = \underline{63,2 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{KS} = C_{RES} y_{KS} \text{ N/mm}^2 = 0,15 \times 1,44 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,216 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{KS} = b a p_{KS} = 481 \times 520 \times 0,216 \text{ N} = \underline{54,0 \text{ kN}}$$

4.1.5.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v , sporstandard k , standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned}v &= 1,0 \\k &= 0,2 \\s &= 0,2 \\t &= 3\end{aligned}$$

Ekstremfaktor d :

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med $d = 1,6$.

$$Q_{\text{DYN}} = Q_{\text{KS}} \times d = 143,75 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{230,0 \text{ kN}}$$

$$y_{\text{DYN}} = y_{\text{KS}} \times d = 1,44 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{2,30 \text{ mm}}$$

$$M_{\text{DYN}} = M_{\text{KS}} \times d = 23,838 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{38,141 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = \sigma_{\text{FOT U.K. KS}} \times d = 63,2 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{101,1 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{\text{DYN}} = p_{\text{KS}} \times d = 0,216 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,346 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{\text{DYN}} = S_{\text{KS}} \times d = 54,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{86,4 \text{ kN}}$$

4.1.5.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{\text{BRUDD}} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = 63,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = 101,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{\text{EGEN FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{\text{TEMP}} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{\text{SAMLET}} = \sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} + \sigma_{\text{EGEN FOT}} + \sigma_{\text{TEMP}} = 101,1 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 351,1 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2.$$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2/1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 101,1 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 25 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,15 N/mm³, UIC60, 25 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,346 > 0,30 N/mm²).
- Støttepunktkraften er mindre enn kravet for betongsville (86,4 < 150 kN).

4.1.6 Aksellast P = 30 tonn, UIC60**4.1.6.1 Kvasistatisk tilstand**Aksellast:

$$P = 30 \text{ tonn} \sim 300 \text{ kN}$$

Vertikal hjullast:

$$Q_0 = P/2 = 300/2 \text{ kN} = \underline{150 \text{ kN}}$$

Kvasistatisk tillegg:

For beskrivelse av kvasistatisk tillegg henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$\Delta Q = 0,15 Q_0 = 0,15 \times 150 \text{ kN} = 22,50 \text{ kN}$$

Kvasistatisk kraft:

$$Q_{ks} = Q_0 + \Delta Q = 150 \text{ kN} + 22,50 \text{ kN} = \underline{172,50 \text{ kN}}$$

Langsvilleoverbygning:

For beskrivelse av langsvillebredde b henvises det til kap. 2.1.1.1.

Langsvillebredde: $b = 481 \text{ mm}$

Ballastsiffer C:

For beskrivelse av ballastsiffer C henvises det til kap. 2.1.1.1. og kap. 4.1.1.1.

$$C_{\text{RES}} = 0,15 \text{ N/mm}^3$$

Grunnverdi L:

For beskrivelse av grunnverdi L og invirkningen flere aksler får på nedbøyning og moment i skinnen ($2,36 L = 1.822 \text{ mm} > 1.420/1.500 \text{ mm}$ og $1.700/1.780 \text{ mm}$), henvises det til kap. 4.1.5.1.

$$L = 772 \text{ mm}$$

Deformasjon/nedbøyning av skinnen:

For beskrivelse av superposisjonsprinsippet henvises det til kap. 4.1.5.1.

$$y_{\text{KS TOTAL}} = \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 772} + \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 772} e^{-\frac{1420}{772}} \left(\cos \frac{1420}{772} + \sin \frac{1420}{772} \right) \\ + \frac{172.500}{2 \cdot 481 \cdot 0,15 \cdot 772} e^{-\frac{1780}{772}} \left(\cos \frac{1780}{772} + \sin \frac{1780}{772} \right)$$

$$y_{\text{KS TOTAL}} = 1,55 + 0,17 + 0,01 = 1,73 \text{ mm}$$

Moment i skinnen:

For beskrivelse av superposisjonsprinsippet henvises det til kap. 4.1.5.1.

$$M_{\text{KS TOTAL}} = \frac{172.500 \cdot 772}{4} + \frac{172.500 \cdot 772}{4} e^{-\frac{1780}{772}} \left(\cos \frac{1780}{772} - \sin \frac{1780}{772} \right) \text{ Nmm}$$

$$M_{\text{KS TOTAL}} = 33,293 \times 10^6 + (-4,688 \times 10^6) \text{ Nmm} = 28,605 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

Bøyesspenningen midt på skinnefoten:

Skinneprofil UIC60, motstandsmoment om X-aksen $W_{xx} = 377,4 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = \frac{M_{\text{KS}}}{W_{\text{FOT}}} \text{ N/mm}^2 = \frac{28.605.000}{377.400} \text{ N/mm}^2 = \underline{75,8 \text{ N/mm}^2}$$

Trykket mot svillens underside:

For beskrivelse av ballasttrykket henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$p_{\text{KS}} = C_{\text{RES}} y_{\text{KS}} \text{ N/mm}^2 = 0,15 \times 1,73 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,260 \text{ N/mm}^2}$$

Støttepunktraften under svillen:

For beskrivelse av støttepunktraften S henvises det til kap. 2.1.1.1.

$$S_{\text{KS}} = b a p_{\text{KS}} = 481 \times 520 \times 0,260 \text{ N} = \underline{65,0 \text{ kN}}$$

4.1.6.2 Dynamisk tilstand

Beregning av hastighetsavhengig faktor v, sporstandard k, standardavvik s og statistisk sikkerhet t henvises det til kap. 2.1.1.2.

$$\begin{aligned} v &= 1,0 \\ k &= 0,2 \\ s &= 0,2 \\ t &= 3 \end{aligned}$$

Ekstremfaktor d:

$$d = (1,0 + t \times s) = (1,0 + 3 \times 0,2) = \underline{1,6}$$

Alle beregnede verdier i kvasistatisk tilstand multipliseres med d = 1,6.

$$Q_{\text{DYN}} = Q_{\text{KS}} \times d = 172,50 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{276,0 \text{ kN}}$$

$$y_{\text{DYN}} = y_{\text{KS}} \times d = 1,73 \times 1,6 \text{ mm} = \underline{2,77 \text{ mm}}$$

$$M_{\text{DYN}} = M_{\text{KS}} \times d = 28,605 \times 10^6 \times 1,6 \text{ Nmm} = \underline{45,768 \times 10^6 \text{ Nmm}}$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = \sigma_{\text{FOT U.K. KS}} \times d = 75,8 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{121,3 \text{ N/mm}^2}$$

$$p_{\text{DYN}} = p_{\text{KS}} \times d = 0,260 \times 1,6 \text{ N/mm}^2 = \underline{0,416 \text{ N/mm}^2}$$

$$S_{\text{DYN}} = S_{\text{KS}} \times d = 65,0 \times 1,6 \text{ kN} = \underline{104,0 \text{ kN}}$$

4.1.6.3 Skinnespenninger

Skinnespenninger for senter skinnefot:

$$\text{Bruddspenningen } \sigma_{\text{BRUDD}} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}} = 75,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} = 121,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Egenspenning for senter skinnefot er: } \sigma_{\text{EGEN FOT}} = 120,0 \text{ N/mm}^2$$

Bruker en temperaturendring på 50 °C.

$$\text{Temperaturspenning: } \sigma_{\text{TEMP}} = \alpha \times \Delta T \times E \sim 130,0 \text{ N/mm}^2$$

Samlet spenning for senter skinnefot i dynamisk tilstand:

$$\sigma_{\text{SAMLET}} = \sigma_{\text{FOT U.K. DYN}} + \sigma_{\text{EGEN FOT}} + \sigma_{\text{TEMP}} = 121,3 + 120,0 + 130,0 \text{ N/mm}^2 = 371,3 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2.$$

Antar at flytespenningen σ_{FLYT} er 64 % av bruddspenningen. For 1200-kvalitet: $\sigma_{\text{FLYT}} = 755 \text{ N/mm}^2$.

Utmatting:

For beskrivelse av utmatting henvises det til kap. 2.1.1.3.

$$260 \text{ N/mm}^2 / 1,4 = 185 \text{ N/mm}^2 > 121,3 \text{ N/mm}^2$$

For en skinne med 1200-kvalitet, vil den tillatte trafikkspenningen ligge enda noe høyere og derfor skulle det ikke være fare for utmatting ved 30 tonns aksellast.

Konklusjon: (C = 0,15 N/mm³, UIC60, 30 tonn)

- Ingen fare for skinnebrudd på grunn av skinnespenninger i senter skinnefot.
- I følge Smiths diagram er det ingen fare for utmatting av skinnen.
- Ballasttrykket er for stort for betongsville (0,416 > 0,30 N/mm²).
- Støttepunktraften er mindre enn kravet for betongsville (104,0 < 150 kN).

4.1.7 Sammenstilling av resultater for beregninger med $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$

I figur 4.1.7.i er beregningsresultatene med ballastsiffer $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$ vist.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider kravet.

		S49		S54		UIC60	
		25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
K V A S T I S T A T I S K	Q_0 (kN)	125	150	125	150	125	150
	Q_{KS} (kN)	143,75	172,50	143,75	172,50	143,75	172,50
	y_{KS} (mm)	1,54	1,84	1,51	1,81	1,44	1,73
	M_{KS} (10^6 Nmm)	24,366	29,239	25,192	30,231	23,838	28,605
	$\sigma_{\text{FOT U.K. KS}}$ (N/mm^2)	101,5	121,8	91,3	109,5	63,2	75,8
	p_{KS} (N/mm^2)	0,231	0,276	0,227	0,272	0,216	0,260
	S_{KS} (kN)	57,8	69,0	56,8	68,0	54,0	65,0
D Y N A M I S K	Q_{DYN} (kN)	230	276	230	276	230	276
	y_{DYN} (mm)	2,46	2,94	2,42	2,90	2,30	2,77
	M_{DYN} (10^6 Nmm)	38,986	46,782	40,307	48,370	38,141	45,768
	$\sigma_{\text{FOT U.K. DYN}}$ (N/mm^2)	162,4	194,9	146,1	175,2	101,1	121,3
	p_{DYN} (N/mm^2)	0,370	0,442	0,363	0,435	0,346	0,416
	$p_{\text{DYN BET. SVILLE}}$ (N/mm^2)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	S_{DYN} (kN)	92,5	110,4	90,9	108,8	86,4	104,0
	$S_{\text{DYN BET. SVILLE}}$ (kN)	150	150	150	150	150	150
$\sigma_{\text{FOT U.K. SAMLET}}$ (N/mm^2)	412,4	444,9	396,1	425,2	351,1	371,3	

Figur 4.1.7.i

4.1.8 Kontroll av kvasistatiske- og dynamiske spenninger

Når det gjelder kravene til kvasistatiske- og dynamiske spenninger se kap. 2.1.8.

I figur 4.1.8.i vises opptredende kvasistatiske og dynamiske skinnespenninger i senter underkant fot i forhold til den erfaringsmessige grenseverdier.

Mørklagte ruter betyr at verdiene overskrider kravene.

		S49		S54		UIC60	
		25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
K S	Krav 900 (N/mm ²)	88,0	88,0				
	Krav 1200 (N/mm ²)			118,0	118,0	118,0	118,0
	Krav 1400 (N/mm ²)					138,0	138,0
	$\sigma_{\text{FOTLUK KS}}$ (N/mm ²)	101,5	121,8	91,3	109,5	63,2	75,8
D Y N	Krav 900 (N/mm ²)	140,8	140,8				
	Krav 1200 (N/mm ²)			188,8	188,8	188,8	188,8
	Krav 1400 (N/mm ²)					220,8	220,8
	$\sigma_{\text{FOTLUK DYN}}$ (N/mm ²)	162,4	194,9	146,1	175,2	101,1	121,3

Figur 4.1.8.i

Konklusjon:

- Kravet til kvasistatiske og dynamiske skinnespenninger utfra levetids- og økonomiske vurderinger, overskrides for S49 (900-kvalitet) både ved en aksellast på 25 tonn og 30 tonn.
- Ingen overskridelser av anbefalte grenser ved andre skinne-/lastkombinasjoner

4.2 KOMBINASJON AV HORIZONTAL OG VERTIKALE KREFTER Y/Q

4.2.1 Horisontale/laterale krefter Y

For beskrivelse av horisontale/laterale krefter Y henvises det til kap. 2.2.1. med underkapittel.

4.2.2 Skinnespenninger for S49, P = 25 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil S49
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{\text{DYN}} = 230 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{\text{DYN}}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{\text{TEMP}} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{\text{DYN}} = 230 \text{ kN}$ er vist i figur 4.2.2.i.

Den største spenningen på skinnehodet er på den siden hvor lasten blir påført for aksellast på 25 tonn. Et negativt tall angir at det er trykkspenninger.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
σ_{HODE}	-46,6	-112,5	-178,4	-244,3	-310,2	-376,1	-442,0	-507,9	-573,8	-639,7
σ_{FOT}	354,8	385,4	415,9	446,4	477,0	507,5	538,0	568,6	599,1	629,6
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE INNERST}$	-216,6	-282,5	-348,4	-414,3	-480,2	-546,1	-612,0	-677,9	-743,8	-809,7
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	424,8	455,4	485,9	516,4	547,0	577,5	608,0	638,6	669,1	699,6

Figur 4.2.2.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 13.

4.2.3 Skinnespenninger for S49, P = 30 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil S49
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$ er vist i figur 4.2.3.i.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider bruddspenningen.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
σ_{HODE}	140,5	219,5	298,6	377,7	456,8	535,9	615,0	694,1	773,2	852,3
σ_{FOT}	425,8	462,4	499,1	535,7	572,4	609,0	645,6	682,3	718,9	755,6
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE YTTERST}$	230,5	309,5	388,6	467,7	546,8	625,9	705,0	784,1	863,2	942,3
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	495,8	532,4	569,1	605,7	642,4	679,0	715,6	752,3	788,9	825,6

Figur 4.2.3.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 14.

4.2.4 Skinnespenninger for S54, P = 25 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil S54
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 230 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 230 \text{ kN}$ er vist i figur 4.2.4.i.

Den største spenningen på skinnehodet er på den siden hvor lasten blir påført for aksellast på 25 tonn. Et negativt tall angir at det er trykkspenninger.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
σ_{HODE}	-40,0	-98,5	-157,1	-215,6	-274,1	-332,7	-391,2	-449,8	-508,3	-566,8
σ_{FOT}	316,4	342,7	369,1	395,5	421,8	448,2	474,6	500,9	527,3	553,8
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE INNERST}$	-210,0	-268,5	-327,1	-385,6	-444,1	-502,7	-561,2	-619,8	-678,3	-736,8
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	386,4	412,7	439,1	465,5	491,8	518,2	544,6	570,9	597,3	623,8

Figur 4.2.4.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 15 .

4.2.5 Skinnespenninger for S54, P = 30 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil S54
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$ er vist i figur 4.2.5.i.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
σ_{HODE}	130,1	200,3	270,6	340,8	411,1	481,3	551,6	621,8	692,1	762,3
σ_{FOT}	379,6	411,3	442,9	474,6	506,2	537,8	569,5	601,1	632,8	664,4
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE YTTERST}$	220,1	290,3	360,6	430,8	501,1	571,3	641,6	711,8	782,1	852,3
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	449,6	481,3	512,9	544,6	576,2	607,8	639,5	671,1	702,8	734,4

Figur 4.2.5.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 16.

4.2.6 Skinnespenninger for UIC60, P = 25 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil UIC60
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 230 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 230 \text{ kN}$ er vist i figur 4.2.6.i.

Den største spenningen på skinnehodet er den på siden hvor lasten blir påført for aksellast på 25 tonn. Et negativt tall angir at det er trykkspenninger.

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
σ_{HODE}	-36,0	-104,1	-172,3	-240,4	-308,6	-376,8	-444,9	-513,1	-581,3	-649,4
σ_{FOT}	236,7	250,5	264,2	278,0	291,7	305,5	319,2	333,0	346,8	360,5
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE INNERST}$	-206,0	-274,1	-342,3	-410,4	-478,6	-546,8	-614,9	-683,1	-751,3	-819,4
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	306,7	320,5	334,2	348,0	361,7	375,5	389,2	403,0	416,8	430,5

Figur 4.2.6.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 17.

4.2.7 Skinnespenninger for UIC60, P = 30 tonn

Forutsetninger:

- Ballastsiffer $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$ (Antatt)
- Skinneprofil UIC60
- Hastighet $V = 50 \text{ km/h}$
- Sporstandarden er middels god $k = 0,2$ (Antatt)
- Eksentrisk belastning på skinnehodet med konstant vertikalkraft $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$
- Horisontalkraft Y_{DYN} varierer fra $0,3 - 1,2 \times Q_{DYN}$ som angriper skinnehodet i en avstand lik 14 mm under overkant skinnehode
- Egenspenninger
 - Skinnehode : $-40,0 \text{ N/mm}^2$
 - Skinnefot : $-60,0 \text{ N/mm}^2$
- Temperaturspenninger: $\sigma_{TEMP} = 130,0 \text{ N/mm}^2$

Skinnespenninger i alle 4 beregningspunkt er kontrollert. Ekstrempunktene er ytterst, med mindre annet er oppgitt.

Resultater med konstant $Q_{DYN} = 276 \text{ kN}$ er vist i figur 4.2.7.i

$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Y_{DYN} (kN)	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
σ_{HODE}	133,9	215,7	297,5	379,3	461,1	542,9	624,7	706,5	788,3	870,1
σ_{FOT}	284,0	300,5	317,1	333,6	350,1	366,6	383,1	399,6	416,1	432,6
$\sigma_{EGEN HODE}$	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0	-40,0
$\sigma_{EGEN FOT}$	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0	-60,0
σ_{TEMP}	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
$\sigma_{SAMLET HODE YTTERST}$	230,9	305,7	387,5	469,3	551,1	632,9	714,7	796,5	878,3	960,1
$\sigma_{SAMLET FOT YTTERST}$	367,2	383,7	400,2	416,7	433,2	449,7	466,2	482,7	499,2	515,7

Figur 4.2.7.i

Skinnespenningene som en funksjon av Y/Q-forholdet er vist i appendiks 18.

4.2.8 Vurdering av de dynamiske kreftene fra boggikonstruksjon

De teoretiske vurderingene av de dynamiske kreftene fra boggikonstruksjonen henvises til kap. 2.2.8. Spenningsene beregnet med $d = 1,45$ sammenlignes med de beregningene som ble gjort tidligere med $k = 0,2$ både for 25 tons og 30 tons aksellast og er vist i figur 4.2.8.i.

		Q_{DYN} (kN)	Y_{DYN} (mm)	M_{DYN} (10^6 Nmm)	$\sigma_{FORLIK DYN}$ (N/mm ²)	p_{DYN} (N/mm ²)	S_{DYN} (kN)	$\sigma_{FOT SAMLET}$ (N/mm ²)
S 4 9	25 t (k=0,2)	230	2,46	38,986	162,4	0,370	92,5	412,4
	30 t (k=0,2)	276	2,94	46,782	194,9	0,442	110,4	444,9
	30 t (k=0,15)	250	2,67	42,397	176,6	0,400	100,1	426,6
S 5 4	25 t (k=0,2)	230	2,42	40,307	146,1	0,363	90,9	396,1
	30 t (k=0,2)	276	2,90	48,370	175,2	0,435	108,8	425,2
	30 t (k=0,15)	250	2,63	43,850	158,8	0,394	98,6	408,8
U I C 6 0	25 t (k=0,2)	230	2,30	38,141	101,1	0,346	86,4	351,1
	30 t (k=0,2)	276	2,77	45,768	121,3	0,416	104,0	371,3
	30 t (k=0,15)	250	2,51	41,477	109,9	0,377	94,3	359,9

Figur 4.2.8.i

De horisontale kreftene og skinnespenningene i hjørnene blir da endret siden sporstandarden forandres.

I figur 4.2.8.ii er skinnespenningsene for $k = 0,15$ og $P = 30$ tonn beregnet.

Et negativt tall angir at det er trykkspenninger.

		(Y/Q) _{DYN}	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
S49	Y _{DYN} (kN) k = 0,15		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	σ _{SAMLET HOVE INN.}		-220,6	-292,3	-364,0	-435,7	-507,3	-579,0	-650,7	-722,4	-794,0	-865,7
	σ _{SAMLET FOT YTT.}		455,9	489,1	522,3	555,5	588,7	621,9	655,1	688,3	721,5	754,7
S54	Y _{DYN} (kN) k = 0,15		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	σ _{SAMLET HOVE YTT.}		213,0	276,6	340,3	403,9	467,6	531,3	594,9	658,6	722,3	785,9
	σ _{SAMLET FOT YTT.}		403,3	432,0	460,6	489,3	518,0	546,7	575,3	604,0	632,7	661,4
UIC60	Y _{DYN} (kN) k = 0,15		75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	σ _{SAMLET HOVE INN.}		-217,0	-291,2	-365,3	-439,4	-513,5	-587,7	-661,8	-735,9	-810,1	-884,2
	σ _{SAMLET FOT YTT.}		339,3	354,3	369,2	372,7	399,1	414,1	429,1	444,0	459,0	473,9

Figur 4.2.8.ii

4.3 SAMMENDRAG FOR BEREGNINGER MED $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$

For disse tre skinnprofilene er det flere felles parametre. De kan kort nevnes slik:

- Kvasistatisk tillegg (15 %)
- Langsvillebredde $b = 481 \text{ mm}$
- Svilleavstand $a = 520 \text{ mm}$
- Ballastsiffer $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$
- Hastighetsavhengig faktor $v = 1,0$
- Sporstandard $k = 0,2$
- Statistisk sikkerhet $t = 3$
- Hjulradien på godsvognene $r = 490 \text{ mm}$

Grunnverdi L er avhengig av skinnprofilenes treghetsmoment om X -aksen.

Resultatene for beregningene i kvasistatisk og dynamisk tilstand for S49, S54 og UIC60 er sammenstilt i figur 4.3.i og den viser forskjellene i spenningene, kreftene og nedbøyningen.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider kravet.

		S49		S54		UIC60	
		25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
K V A S I S T A T I S K	Q_0 (kN)	125	150	125	150	125	150
	Q_{KS} (kN)	143,75	172,50	143,75	172,50	143,75	172,50
	y_{KS} (mm)	1,54	1,84	1,51	1,81	1,44	1,73
	M_{KS} (10^6 Nmm)	24,366	29,239	25,192	30,231	23,838	28,605
	$\sigma_{FOT\ U.K.\ KS}$ (N/mm ²)	101,5	121,8	91,3	109,5	63,2	75,8
	p_{KS} (N/mm ²)	0,231	0,276	0,227	0,272	0,216	0,260
	S_{KS} (kN)	57,8	69,0	56,8	68,0	54,0	65,0
D Y N A M I S K	Q_{DYN} (kN)	230	276	230	276	230	276
	y_{DYN} (mm)	2,46	2,94	2,42	2,90	2,30	2,77
	M_{DYN} (10^6 Nmm)	38,986	46,782	40,307	48,370	38,141	45,768
	$\sigma_{FOT\ U.K.\ DYN}$ (N/mm ²)	162,4	194,9	146,1	175,2	101,1	121,3
	p_{DYN} (N/mm ²)	0,370	0,442	0,363	0,435	0,346	0,416
	$p_{DYN\ RET\ SVILLE}$ (N/mm ²)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	S_{DYN} (kN)	92,5	110,4	90,9	108,8	86,4	104,0
	$S_{DYN\ RET\ SVILLE}$ (kN)	150	150	150	150	150	150
$\sigma_{FOT\ U.K.\ SAMLET}$ (N/mm ²)	412,4	444,9	396,1	425,2	351,1	371,3	

Figur 4.3.i

Det er resultatene for de dynamiske tilstandene som er av størst interesse i denne sammenhengen. I tillegg til de samme parametrene som ovenfor kommer spenningene i hjørnene på skinnene inn. De er avhengige av den horisontale kraften, som igjen er avhengig av forholdet mellom de vertikale og de horisontale kreftene, som påføres skinnene av malmvognene. I figur 4.3.ii vises ekstremverdiene.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider bruddspenningen.

	(Y/Q) _{DYN}	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
S49	Y _{DYN} 25t	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
	σ _{HODE INN}	-216,6	-282,5	-348,4	-414,3	-480,2	-546,1	-612,0	-677,9	-743,8	-809,7
	σ _{FOT YTT}	424,8	455,4	485,9	516,4	547,0	577,5	608,0	638,6	669,1	699,6
σ _{BRUDD} =											
880	Y _{DYN} 30t	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
N/mm ²	σ _{HODE YTT}	230,5	309,5	388,6	467,7	546,8	625,9	705,0	784,1	863,2	942,3
	σ _{FOT YTT}	495,8	532,4	569,1	605,7	642,4	679,0	715,6	752,3	788,9	825,6
S54	Y _{DYN} 25t	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
	σ _{HODE INN}	-210,0	-268,5	-327,1	-385,6	-444,1	-502,7	-561,2	-619,8	-678,3	-736,8
	σ _{FOT YTT}	386,4	412,7	439,1	465,5	491,8	518,2	544,6	570,9	597,3	623,8
σ _{BRUDD} =											
1180	Y _{DYN} 30t	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
N/mm ²	σ _{HODE YTT}	220,1	290,3	360,6	430,8	501,1	571,3	641,6	711,8	782,1	852,3
	σ _{FOT YTT}	449,6	481,3	512,9	544,6	576,2	607,8	639,5	671,1	702,8	734,4
UIC60	Y _{DYN} 25t	69	92	115	138	161	184	207	230	253	276
	σ _{HODE INN}	-206,0	-274,1	-342,3	-410,4	-478,6	-546,8	-614,9	-683,1	-751,3	-819,4
	σ _{FOT YTT}	306,7	320,5	334,2	348,0	361,7	375,5	389,2	403,0	416,8	430,5
σ _{BRUDD} =											
1180	Y _{DYN} 30t	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
N/mm ²	σ _{HODE YTT}	230,9	305,7	387,5	469,3	551,1	632,9	714,7	796,5	878,3	960,1
	σ _{FOT YTT}	367,2	383,7	400,2	416,7	433,2	449,7	466,2	482,7	499,2	515,7

Figur 4.3.ii

Spenningsene i skinnhodet ved 30 tonn blir større for UIC60 enn for S49 når $(Y/Q)_{DYN} \geq 0,6$ og for S54 når $(Y/Q)_{DYN} \geq 0,3$. Ved sammenligning av S49 og S54 (30 tonn) er skinnspenningene størst i S49 ved alle Y/Q-forhold. Både S54 og UIC60 har en bruddgrense på 1180 N/mm², mens S49 har en bruddgrense på 880 N/mm². I tillegg kan UIC60 ha en bruddgrense på 1380 N/mm².

I beregningene som er vist foran, har det dynamiske lasttillegget den samme %-andelen for både 25 tonn og 30 tonn (60 %). Hvis man ikke skal øke det dynamiske lasttillegget, som man har på Ofotbanen idag, men beholde det også på 30 tonn, må man redusere %-andelen på lasttillegget fra 30 tonn fra 60 % til 50 %. Dette kan bare oppnås ved å bedre sporstandarden. Ved å senke k fra 0,2 til 0,15 vil lasttillegget bli redusert fra 60 % til 45 % [se figur 4.3.iii]. Grenseverdien for 900-kvalitet er 185 N/mm² for skinnspenninger i underkant senter skinnfot. Ved en høyere stålqualität (1200) vil denne grenseverdien øke med 20 - 30 %.

		Q_{DYN} (kN)	y_{DYN} (mm)	M_{DYN} (10^6 Nmm)	$\sigma_{FOR U.K. DYN}$ (N/mm ²)	P_{DYN} (N/mm ²)	S_{DYN} (kN)	$\sigma_{FOT.SAMLET}$ (N/mm ²)
S 4 9	25 t (k=0,2)	230	2,46	38,986	162,4	0,370	92,5	412,4
	30 t (k=0,2)	276	2,94	46,782	194,9	0,442	110,4	444,9
	30 t (k=0,15)	250	2,67	42,397	176,6	0,400	100,1	426,6
S 5 4	25 t (k=0,2)	230	2,42	40,307	146,1	0,363	90,9	396,1
	30 t (k=0,2)	276	2,90	48,370	175,2	0,435	108,8	425,2
	30 t (k=0,15)	250	2,63	43,850	158,8	0,394	98,6	408,8
U I C 6 0	25 t (k=0,2)	230	2,30	38,141	101,1	0,346	86,4	351,1
	30 t (k=0,2)	276	2,77	45,768	121,3	0,416	104,0	371,3
	30 t (k=0,15)	250	2,51	41,477	109,9	0,377	94,3	359,9

Figur 4.3.iii

Figur 4.3.iv viser at ved å bedre sporstandarden, reduseres de horisontale kreftene og skinnespenningene.

Mørklagt rute betyr at verdien overskrider bruddspenningen.

	$(Y/Q)_{DYN}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0S49	$Y_{DYN} k = 0,2$	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
	$\sigma_{HODE YTT}$	230,5	309,5	388,6	467,7	546,8	625,9	705,0	784,1	863,2	942,3
	$\sigma_{FOT YTT}$	495,8	532,4	569,1	605,7	642,4	679,0	715,6	752,3	788,9	825,6
880	$Y_{DYN} k = 0,15$	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{HODE INN}$	-220,6	-292,3	-364,0	-435,7	-507,3	-579,0	-650,7	-722,4	-794,0	-865,7
	$\sigma_{FOT YTT}$	455,9	489,1	522,3	555,5	588,7	621,9	655,1	688,3	721,5	754,7
S54	$Y_{DYN} k = 0,2$	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
	$\sigma_{HODE YTT}$	220,1	290,3	360,6	430,8	501,1	571,3	641,6	711,8	782,1	852,3
	$\sigma_{FOT YTT}$	449,6	481,3	512,9	544,6	576,2	607,8	639,5	671,1	702,8	734,4
1180	$Y_{DYN} k = 0,15$	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{HODE YTT}$	213,0	276,6	340,3	403,9	467,6	531,3	594,9	658,6	722,3	785,9
	$\sigma_{FOT YTT}$	403,3	432,0	460,6	489,3	518,0	546,7	575,3	604,0	632,7	661,4
UIC60	$Y_{DYN} k = 0,2$	82,8	110	138	166	193	221	248	276	304	331
	$\sigma_{HODE YTT}$	230,9	305,7	387,5	469,3	551,1	632,9	714,7	796,5	878,3	960,1
	$\sigma_{FOT YTT}$	367,2	383,7	400,2	416,7	433,2	449,7	466,2	482,7	499,2	515,7
1180	$Y_{DYN} k = 0,15$	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	$\sigma_{HODE INN}$	-217,0	-291,2	-365,3	-439,4	-513,5	-587,7	-661,8	-735,9	-810,1	-884,2
	$\sigma_{FOT YTT}$	339,3	354,3	369,2	384,2	399,1	414,1	429,1	444,0	459,0	473,9

Figur 4.3.iv

4.4 KONKLUSJON FOR BALLASTSIFFER $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$

Ved en aksellastøkning fra 25 til 30 tonn vil det kunne oppstå utmattingsbrudd i henhold til skinnespenninger i senter underkant fot i S49 (900-kvalitet), mens i S54 og UIC60 er faren for utmatting liten.

Imidlertid vil sannsynligheten for utmattingsbrudd øke for S54 med ca. 20%, mens det for UIC60 bare vil være rundt 2% når ballastsifferet avtar fra 0,30 til 0,15 N/mm^3 .

De kvasistatiske og dynamiske skinnespenningene overskrider de justerte, tyske, erfaringsmessige grenseverdiene for spenningspotensialet i en skinne ved brudd for S49 både ved 25 og 30 tonn. Spennningene i S54 og UIC60 ligger derimot under de anbefalte verdiene. Dette viser igjen at sporvekslene med S49 er for svake ved en aksellastøkning.

Konklusjonen blir at S54 (1200-kvalitet) kan beholdes ved $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$ ut fra en teknisk vurdering, det vil si skinnespenninger og utmatting, hvis aksellasten økes fra 25 til 30 tonn, men sporvekslene som har S49, må skiftes ut med et større skinneprofil og høyere stålqualität.

5. SKJÆRSPENNINGER SOM KAN FØRE TIL UTVALSING AV SKINNEHODET

5.1 GENERELT

Utvalsing skjer ved at det oppstår store skjærspenninger " τ " i skinnehodet. Tillatt skjærspenning er avhengig av stålets bruddgrense, og det blir flytning i materialet når belastningen gir $\tau > \tau_{\text{TILLATT}}$. Slike belastninger er det viktig å unngå, fordi de reduserer skinnenes levetid. Teorien til dette kapitlet er hentet hos "Die Eisenbahnschiene" av Fritz Fastenrath.

Malmvognenes hjuldiameter er 980 mm og det vil si at hjulradien er 490 mm.

Opptredende skjærspenning i skinnehodet $\tau_{\text{max}}: \tau_{\text{max}} = 412 \sqrt{\frac{Q_{\text{KS}}}{r}}$

Tillatt skjærspenning $\tau_{\text{TILLATT}}: \tau_{\text{TILLATT}} = \frac{0,5\sigma_{\text{BRUDD}}}{\sqrt{3}} \times 1/v$

hvor sikkerhetsfaktoren $v = 1,1$

Felles for alle skinnekaliteter er de opptredende spenningene i skinnehodet. De er bare avhengig av hjulradien og aksellasten.

For 25 tonns aksellast vil opptredende skjærspenning τ_{max} på skinnehodet bli som følger:

Opptredende skjærspenning $\tau_{\text{max}}: \tau_{\text{max}} = 412 \sqrt{\frac{143,75}{490}} \text{ N/mm}^2 = \underline{223 \text{ N/mm}^2}$

For 30 tonns aksellast vil opptredende skjærspenning τ_{max} på skinnehodet bli som følger:

Opptredende skjærspenning $\tau_{\text{max}}: \tau_{\text{max}} = 412 \sqrt{\frac{172,50}{490}} \text{ N/mm}^2 = \underline{244 \text{ N/mm}^2}$

5.2 SKJÆRSPENNINGER I SKINNEHODET VED 25 TONN AKSELLAST

900-kvalitet

Tillatt skjærspenning $\tau_{\text{TILLATT}}: \tau_{\text{TILLATT}} = 231 \text{ N/mm}^2 > \tau_{\text{max}} = 223 \text{ N/mm}^2$.

$\tau_{\text{TILLATT}} > \tau_{\text{max}}$, det er dermed ikke fare for skjærbrudd i skinnehodet.

1200-kvalitet

Tillatt skjærspenning τ_{TILLATT} : $\tau_{\text{TILLATT}} = 310 \text{ N/mm}^2 > \tau_{\text{max}} = 223 \text{ N/mm}^2$.

$\tau_{\text{TILLATT}} > \tau_{\text{max}}$, det er dermed ikke fare for skjærbrudd i skinnehodet.

1400-kvalitet

Tillatt skjærspenning τ_{TILLATT} : $\tau_{\text{TILLATT}} = 362 \text{ N/mm}^2 > \tau_{\text{max}} = 223 \text{ N/mm}^2$.

$\tau_{\text{TILLATT}} > \tau_{\text{max}}$, det er dermed ikke fare for skjærbrudd i skinnehodet.

**5.3 SKJÆRSPENNINGER I SKINNEHODET VED 30 TONN
AKSELLAST**900-kvalitet

Tillatt skjærspenning τ_{TILLATT} : $\tau_{\text{TILLATT}} = 231 \text{ N/mm}^2 < \tau_{\text{max}} = 244 \text{ N/mm}^2$.

$\tau_{\text{TILLATT}} < \tau_{\text{max}}$, det er dermed fare for skjærbrudd i skinnehodet.

1200-kvalitet

Tillatt skjærspenning τ_{TILLATT} : $\tau_{\text{TILLATT}} = 310 \text{ N/mm}^2 > \tau_{\text{max}} = 244 \text{ N/mm}^2$.

$\tau_{\text{TILLATT}} > \tau_{\text{max}}$, det er dermed ikke fare for skjærbrudd i skinnehodet.

1400-kvalitet

Tillatt skjærspenning τ_{TILLATT} : $\tau_{\text{TILLATT}} = 362 \text{ N/mm}^2 > \tau_{\text{max}} = 244 \text{ N/mm}^2$.

$\tau_{\text{TILLATT}} > \tau_{\text{max}}$, det er dermed ikke fare for skjærbrudd i skinnehodet.

**5.4 SAMMENDRAG FOR SKJÆRSPENNINGER SOM KAN FØRE TIL
UTVALSING**

Det er stor fare for utvalsing av skinnene ved en overskridelse av den tillatte skjærspenningen. Med dagens hjuldiameter på 980 mm er det kun for S49 med 900-stålkvalitet og 30 tonn at de opptredende skjærspenningene overskrider de tillatte verdiene. Se figur 5.4.i.

Maksimal skjærspenning τ_{max} vil dessuten stige med rundt 10% ved en endring av aksellasten fra 25 til 30 tonn.

Mørklagte ruter betyr at verdiene overskrider grensene.

	S49 (900-kvalitet)		S54/UIC60 (1200-kvalitet)		S54/UIC60 (1400-kvalitet)	
	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
τ_{\max} (N/mm ²)	223	244	223	244	223	244
τ_{TILLATT} (N/mm ²)	231	231	310	310	362	362

Figur 5.4.i

5.5 KONKLUSJON FOR SKJÆRSPENNINGER SOM KAN FØRE TIL UTVALSING AV SKINNEHODET

Ved 30 tonn aksellast vil det bli utvalsing av skinnehodet på S49 (900-kvalitet). Samtidig ligger opptredende skjærspenning τ_{\max} tett opptil tillatt skjærspenning τ_{TILLATT} ved 25 tonn aksellast.

Alle sporvekslene som idag har skinneprofil S49 (900-kvalitet), må derfor skiftes ut med større skinneprofil og høyere stålkvalitet for å unngå en betydelig utvalsing av skinnehodet hvis aksellasten heves. Større hjul diameter vil senke skjærspenningene, men dette er lite aktuelt å gjennomføre.

For S54 og UIC60 vil det være liten fare for utvalsing på grunn av skjærspenningene både ved 25 og 30 tonn aksellast.

Den opptredende, maksimale skjærspenningen vil stige med ca. 10% som igjen reduserer den tekniske levetiden for skinnene med tilsvarende prosentall.

6. KONTROLL AV MINSTE TILLATTE HJULDIAMETER

Uavhengig av ballastsifferet kan dagens hjul diameter kontrolleres med tanke på overskridelser av bruddspenningen i skinnehodet ved en heving av aksellasten fra 25 til 30 tonn.

Beregning av nødvendig hjulradius skjer etter følgende formel:

$$r_{\text{TILLATT}} > 1,90 \times Q_{\text{KS}} \times \left(\frac{v}{\sigma_{\text{BRUDD}}} \right)^2 \times 10^6 \times \alpha \text{ hvor}$$

r = hjulradius

Q = vertikal hjulkraft

σ = spenning

v = sikkerhetsfaktor = 1,1

α = sporgeometrisk avhengig faktor for kurveradier < 500 m og eventuelt om skinnen er smurt (1,2 - 1,4).

Velger $\alpha = 1,4$.

Resultatene er vist i figur 6.i. r_{TILLATT} er minste tillatte hjulradius og d_{TILLATT} er minste tillatte hjuldiameter. Mørklagte ruter betyr at verdiene overskrider kravene.

	S49		S54		UIC60	
	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn	25 tonn	30 tonn
Q_{KS} (kN)	143,75	172,50	143,75	172,50	143,75	172,50
r idag (mm)	490	490	490	490	490	490
d idag (mm)	980	980	980	980	980	980
$\sigma_{\text{BRUDD } 900}$ (N/mm ²)	880	880				
$\sigma_{\text{BRUDD } 1200}$ (N/mm ²)			1180	1180	1180	1180
$\sigma_{\text{BRUDD } 1400}$ (N/mm ²)					1380	1380
$r_{\text{TILLATT } 900}$ (mm)	600	720				
$r_{\text{TILLATT } 1200}$ (mm)			335	400	335	400
$r_{\text{TILLATT } 1400}$ (mm)					245	295
$d_{\text{TILLATT } 900}$ (mm)	1200	1440				
$d_{\text{TILLATT } 1200}$ (mm)			670	800	670	800
$d_{\text{TILLATT } 1400}$ (mm)					490	590

Figur 6.i

Konklusjon:

- Dagens hjuldiameter på 980 mm er for liten med tanke på bruddspenninger i skinnprofil S49 (900-kvalitet) både ved 25 tonns og 30 tonns aksellast.
- Dagens hjuldiameter skaper derimot ingen problemer med tanke på bruddspenninger i skinnprofil S54 (1200-kvalitet) og UIC60 (1200-kvalitet) hverken ved aksellast på 25 tonn eller 30 tonn.

7. KONKLUSJON

Skinnespenningsberegningene med ballastsiffer C fra 0,15 til 0,3 N/mm³ viser at skinneprofil S54 (1200-kvalitet) kan beholdes på Ofotbanen hvis aksellasten heves fra 25 til 30 tonn. Dette er ut fra en sikkerhetsmessig vurdering med tanke på skinnebrudd/utmattning. Den tekniske levetiden vil imidlertid kunne forventes å synke med ca. 10 % på grunn av økt utvalsing i skinnehodet som igjen skyldes økte opptredende skjærspenninger.

Hvis de justerte erfaringstallene fra Tyskland med hensyn til levetid og økonomi legges til grunn for vurdering av nødvendig skinneprofil, blir resultatet det samme som ovenfor. Det er de kvasistatiske og dynamiske skinnespenningene i underkant senter skinnefot fra trafikkbelastningen som er betraktet.

Sporvekslene på Ofotbanen som har skinneprofil S49 (900-kvalitet), må derimot skiftes ut med et større skinneprofil og høyere stålkvalitet dersom 30 tonn aksellast innføres. Det vil kunne oppstå utmattingsbrudd ved ballastsiffer C = 0,15 N/mm³. De justerte, tyske erfaringsverdiene viser det samme. I tillegg vil skjærspenningene i skinnehodet overskride tillatt verdi. Opptredende skjærspenning vil generelt vokse med ca. 10%.

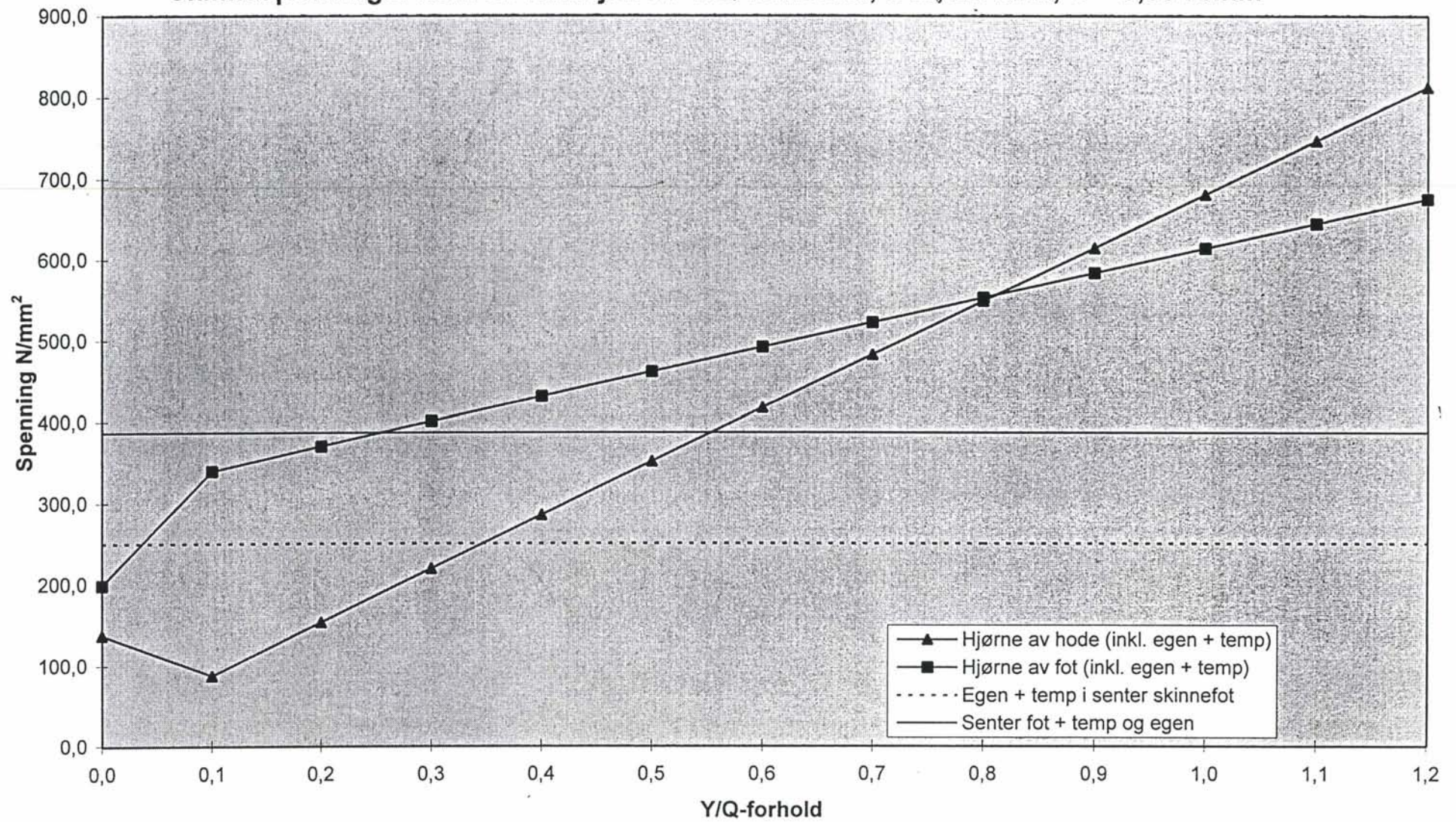
Dagens hjuldiameter på 980 mm er stor nok med hensyn til bruddspenninger i kontaktpunktet hjul/skinne for S54 (1200-kvalitet) og UIC60 (1200-kvalitet), men for S49 (900-kvalitet) oppfyller hjuldiameteren ikke kravene med tanke på bruddspenningene i skinnehodet.

8. APPENDIKSLISTE

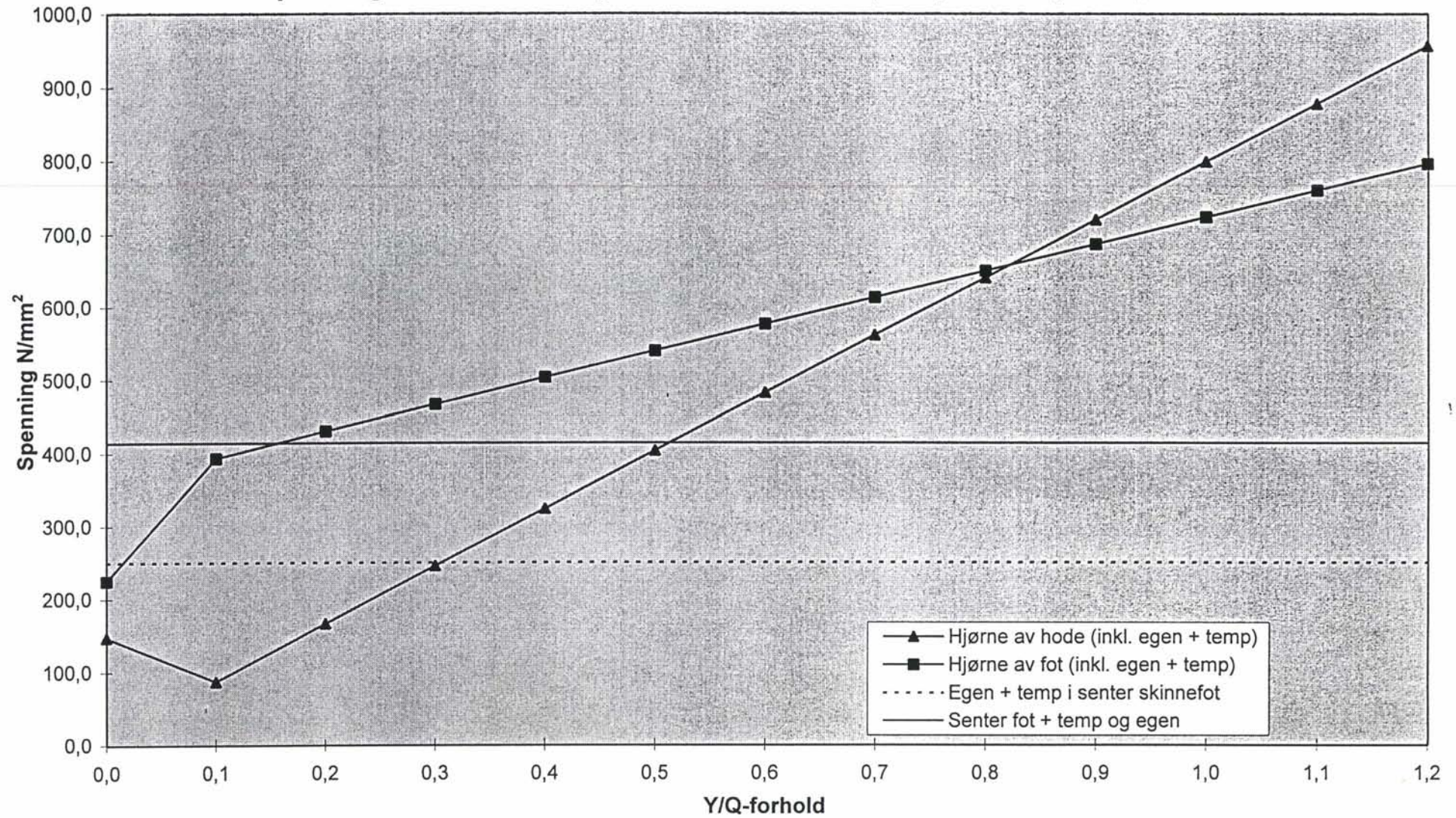
- App. 1 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 25 tonn, $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$
- App. 2 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 30 tonn, $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$
- App. 3 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 25 tonn, $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$
- App. 4 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 30 tonn, $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$
- App. 5 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 25 tonn, $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$
- App. 6 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 30 tonn, $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$
- App. 7 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 25 tonn, $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$
- App. 8 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 30 tonn, $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$
- App. 9 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 25 tonn, $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$
- App. 10 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 30 tonn, $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$
- App. 11 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 25 tonn, $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$
- App. 12 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 30 tonn, $C = 0,20 \text{ N/mm}^3$
- App. 13 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 25 tonn, $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$
- App. 14 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 30 tonn, $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$
- App. 15 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 25 tonn, $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$
- App. 16 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 30 tonn, $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$
- App. 17 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 25 tonn, $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$
- App. 18 Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 30 tonn, $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$

APPENDIKS

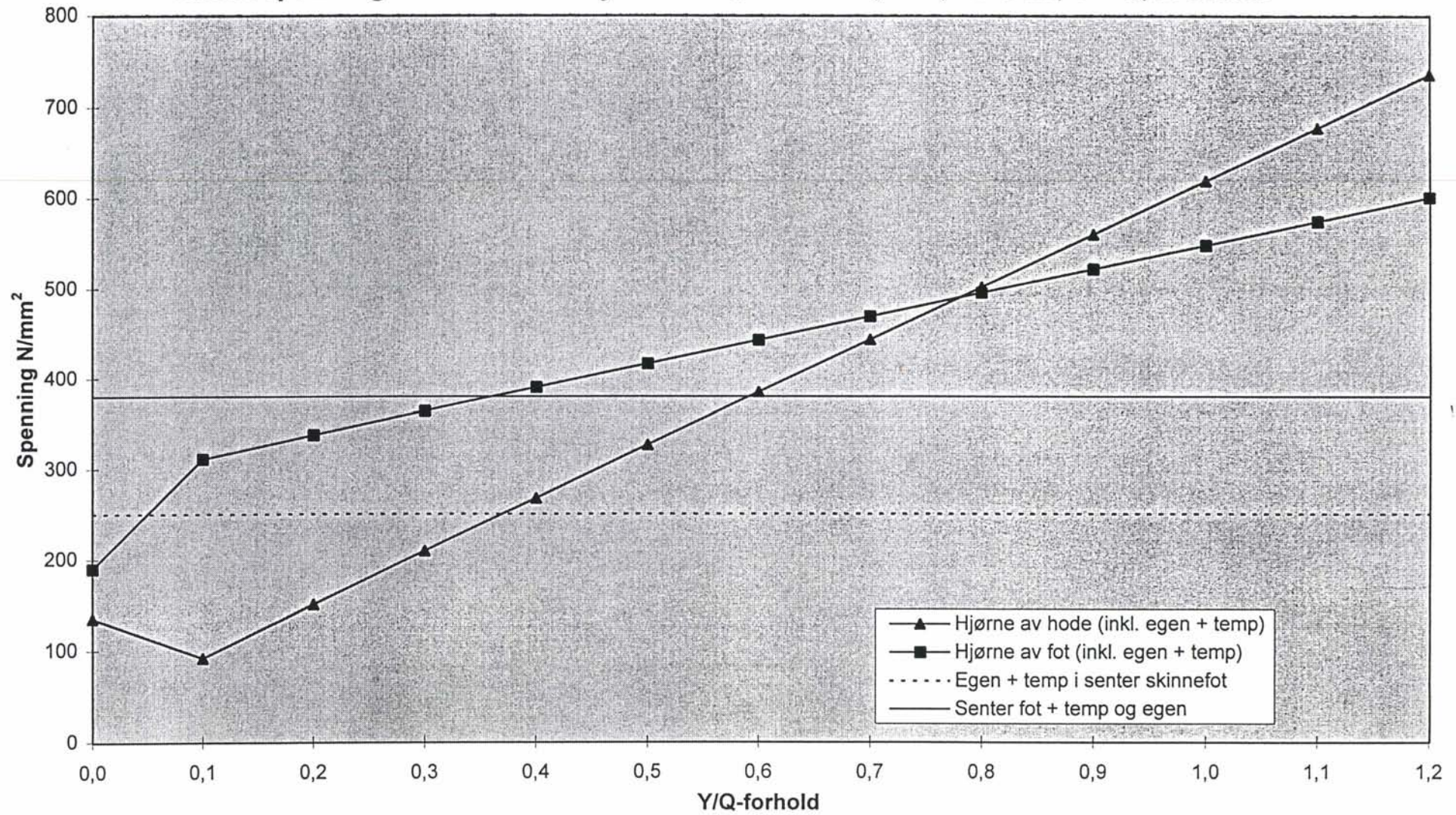
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 25 tonn, C = 0,30 N/mm³



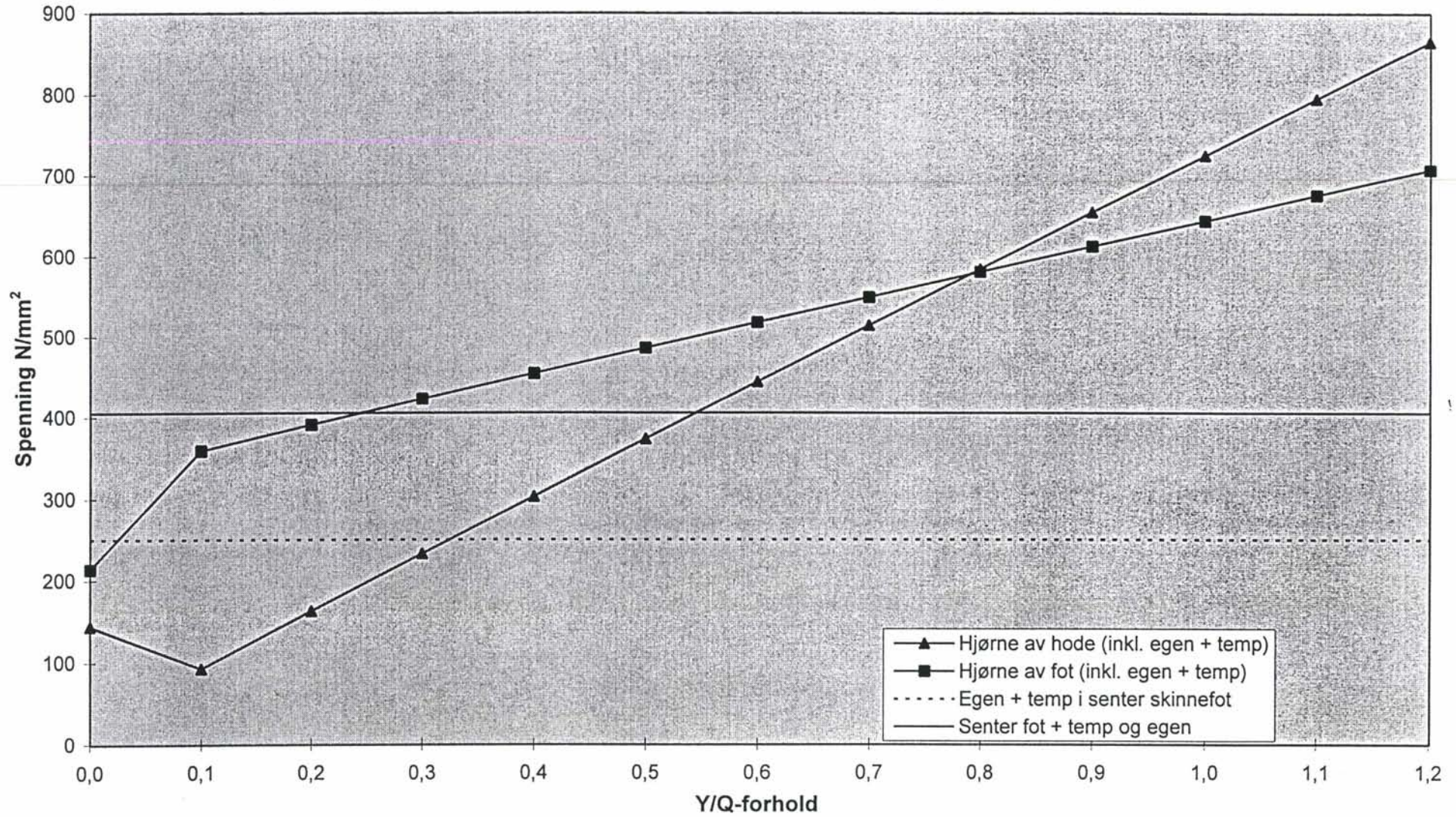
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 30 tonn, C = 0,30 N/mm³



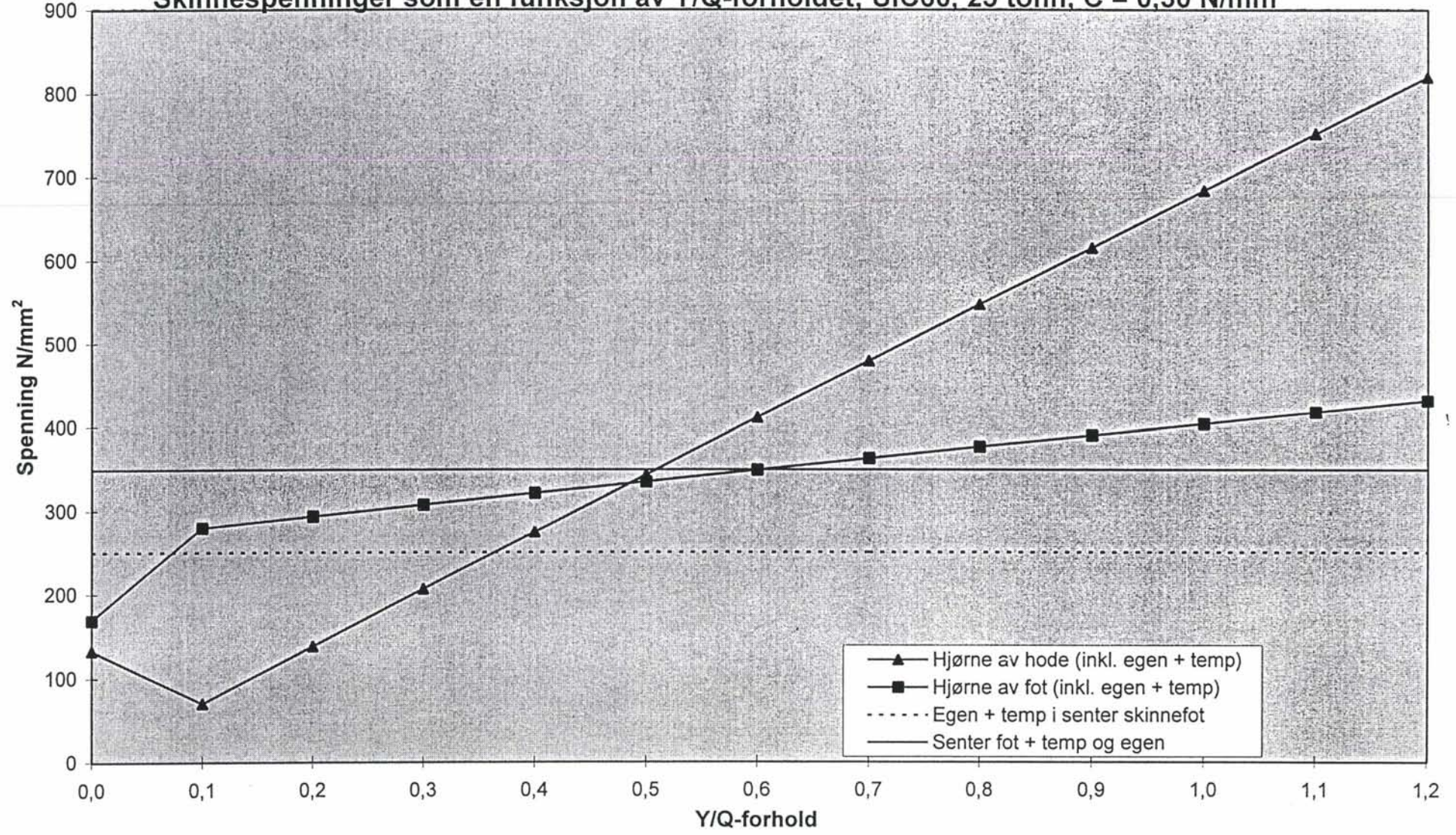
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 25 tonn, C = 0,30 N/mm³



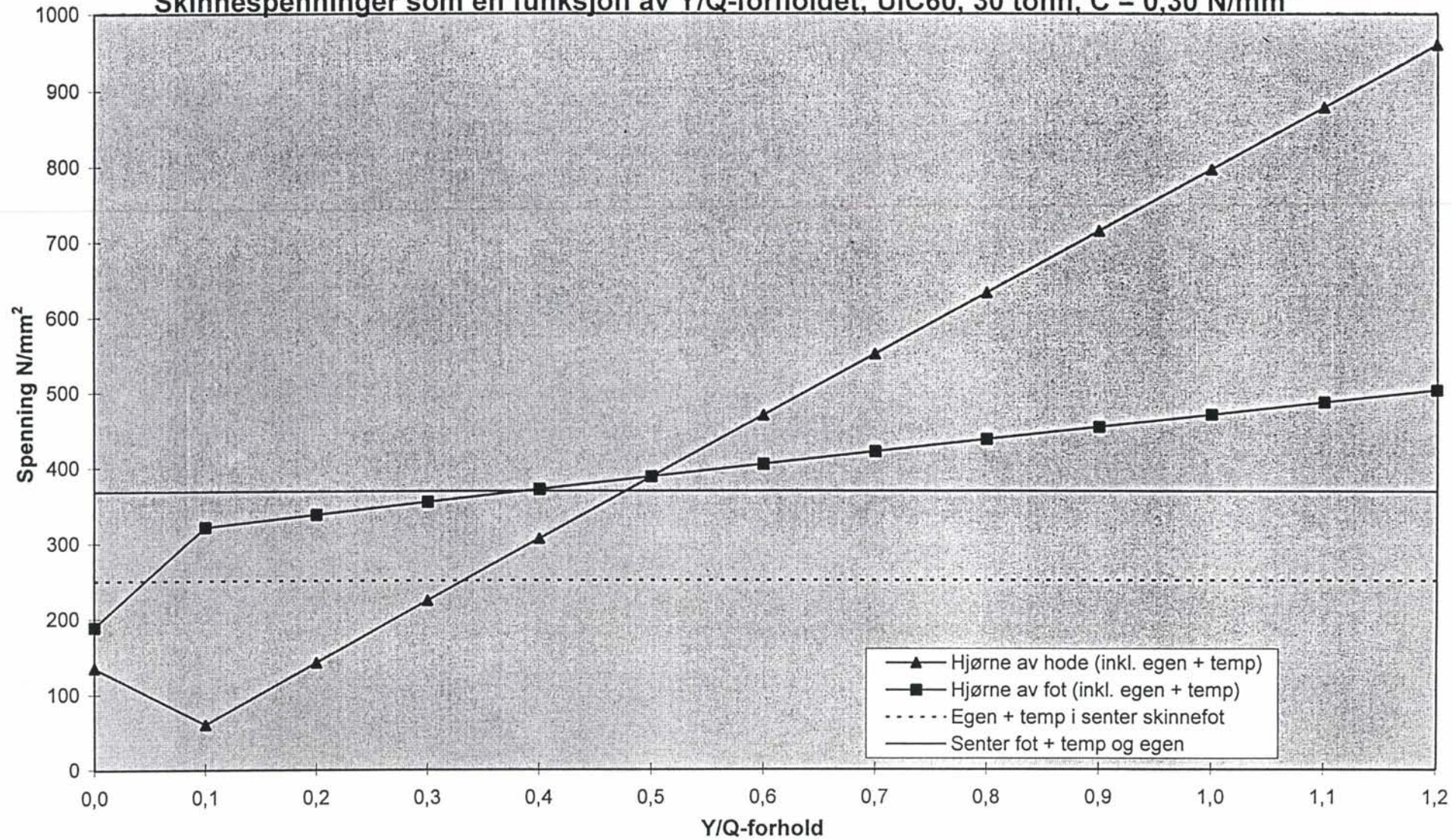
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 30 tonn, C = 0,30 N/mm³



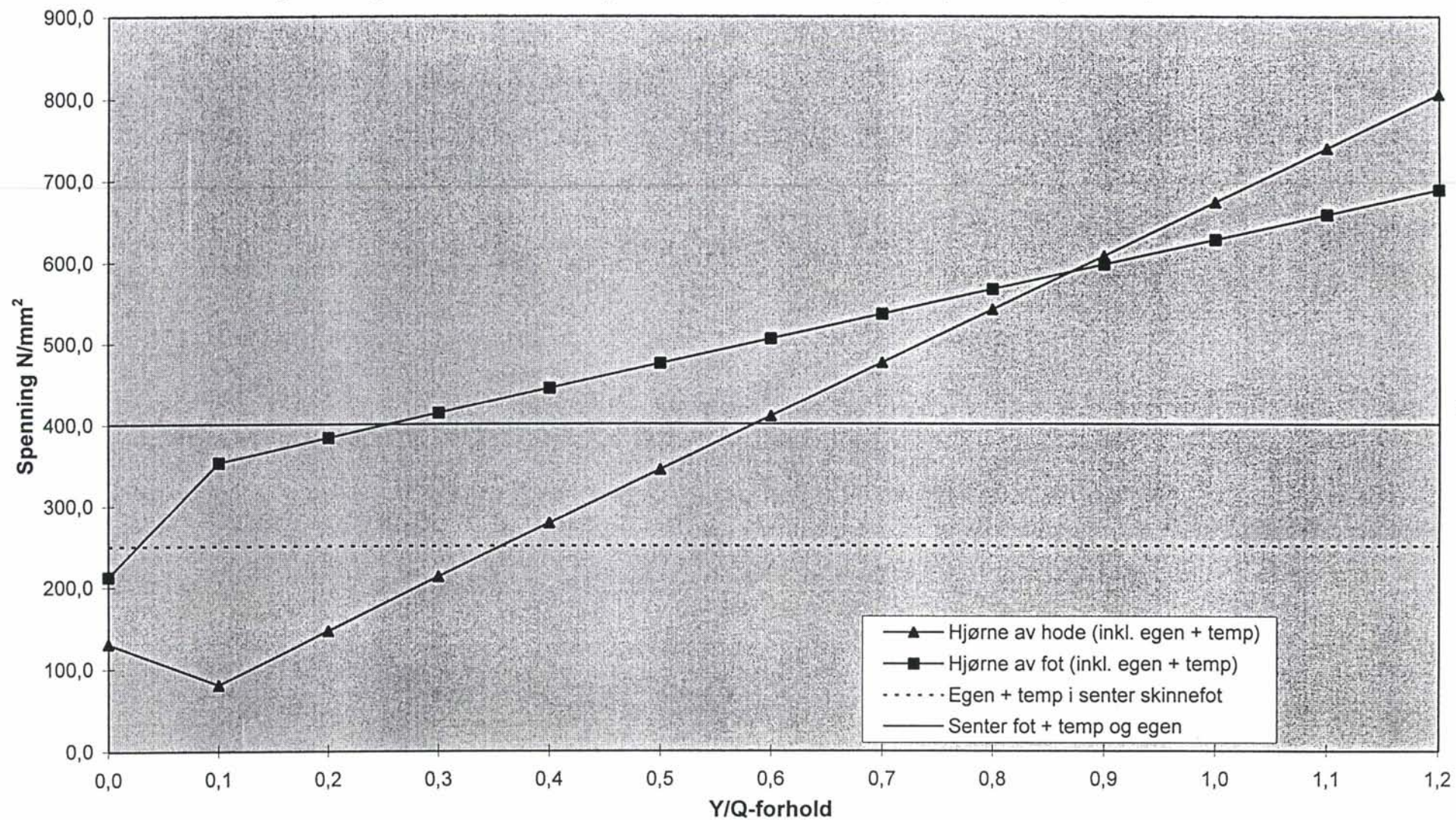
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 25 tonn, C = 0,30 N/mm³



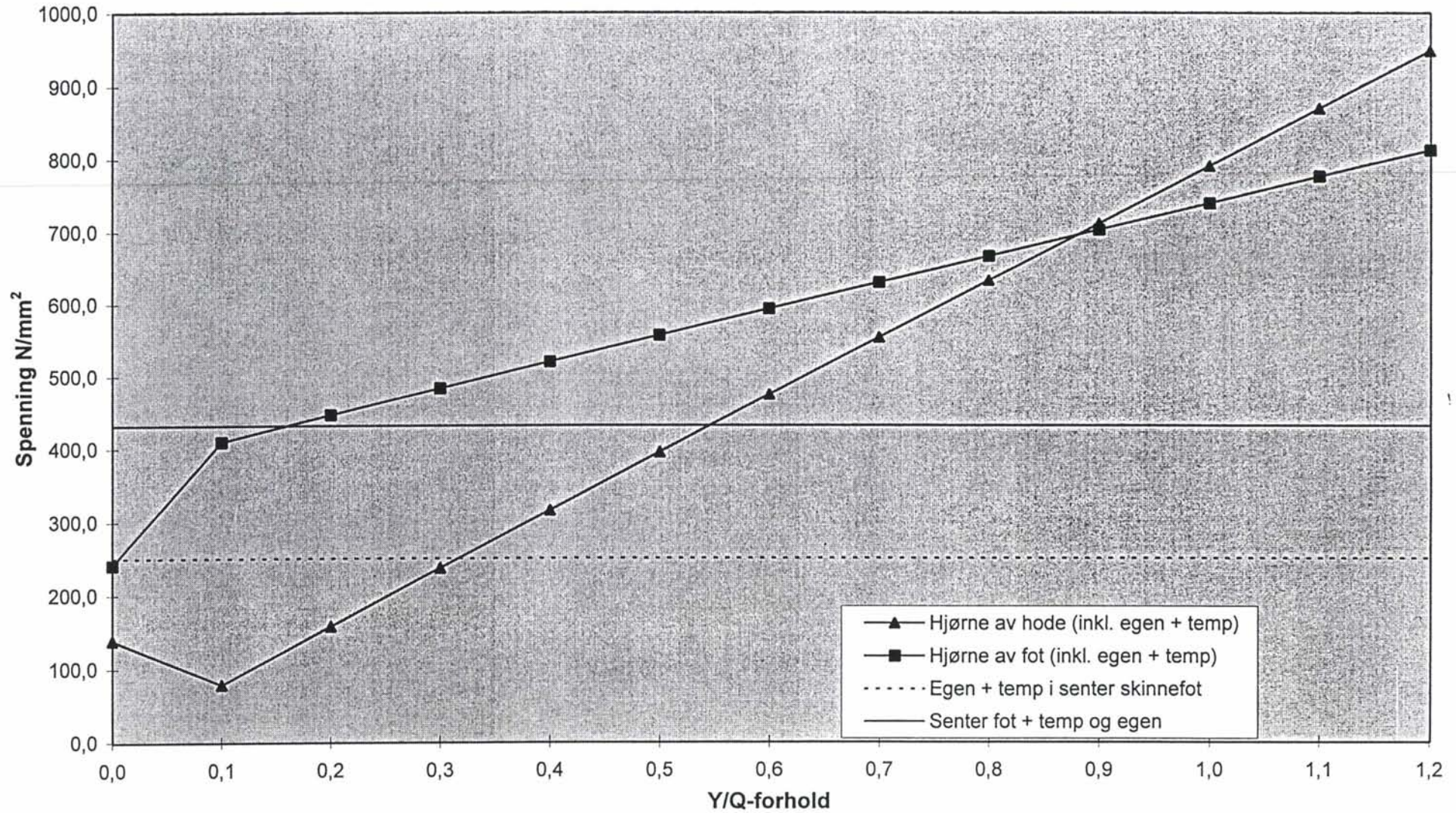
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet: UIC60, 30 tonn, $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$



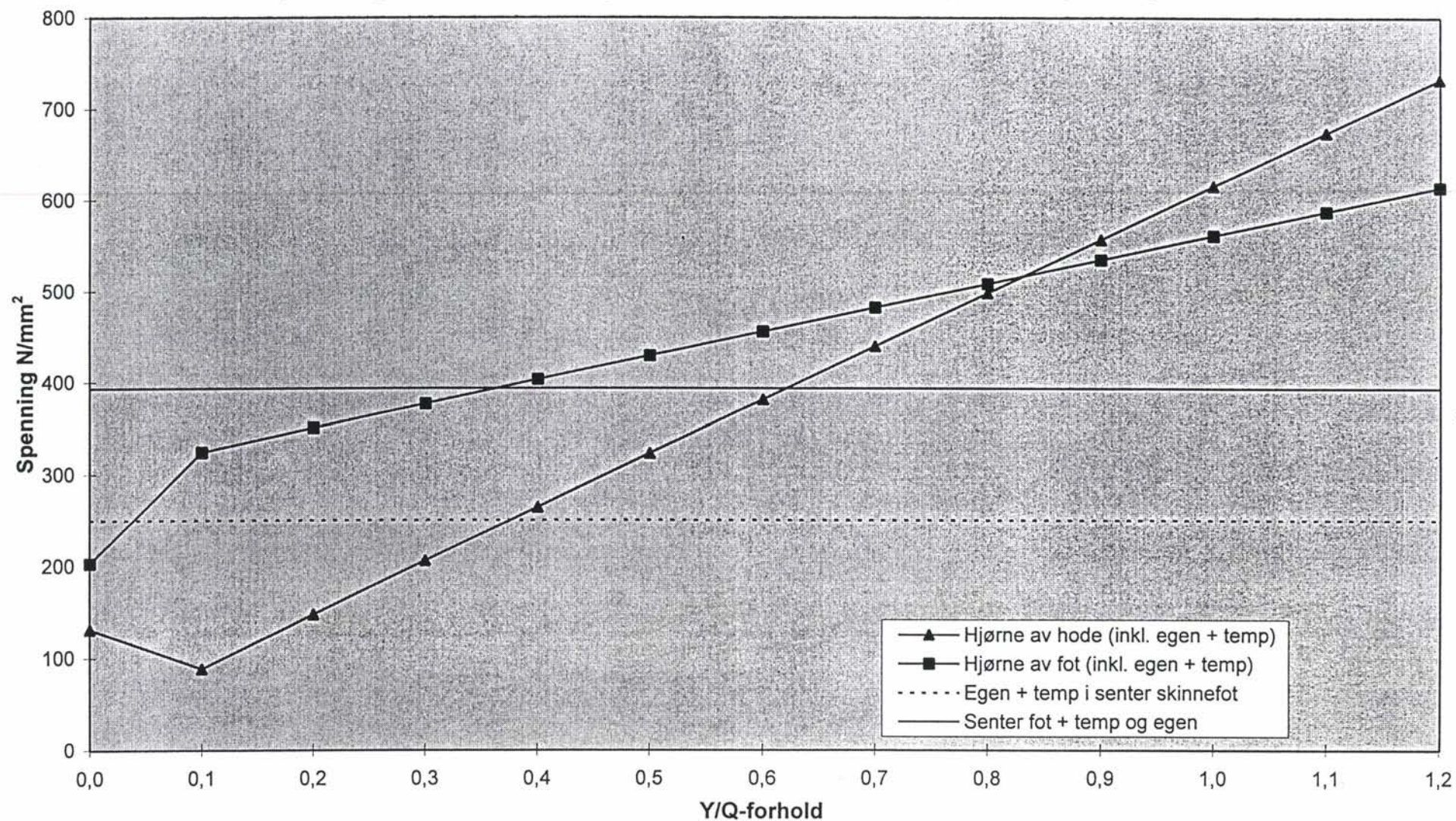
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 25 tonn, C = 0,20 N/mm³



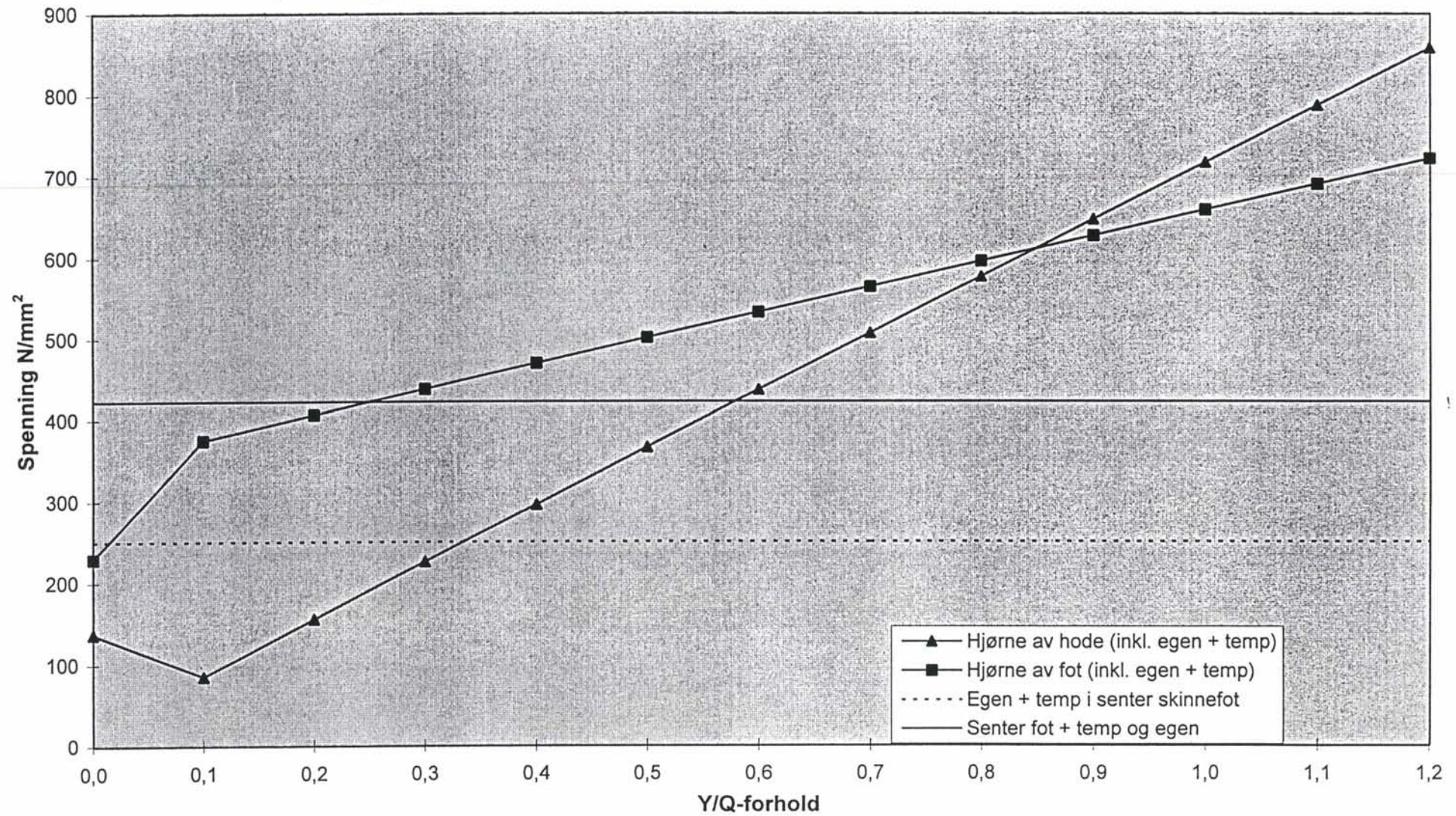
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 30 tonn, C = 0,20 N/mm³



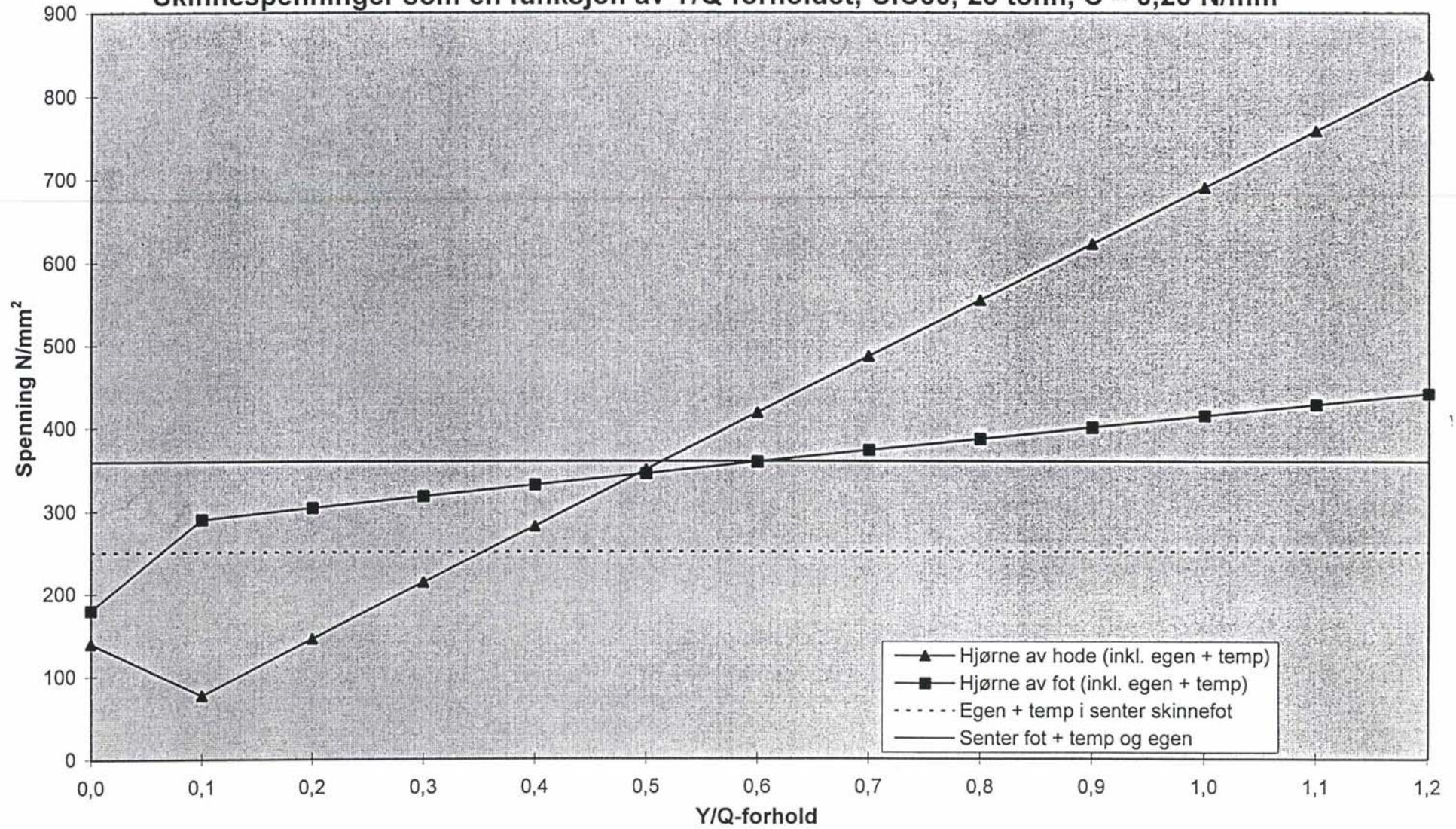
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 25 tonn, C = 0,20 N/mm³



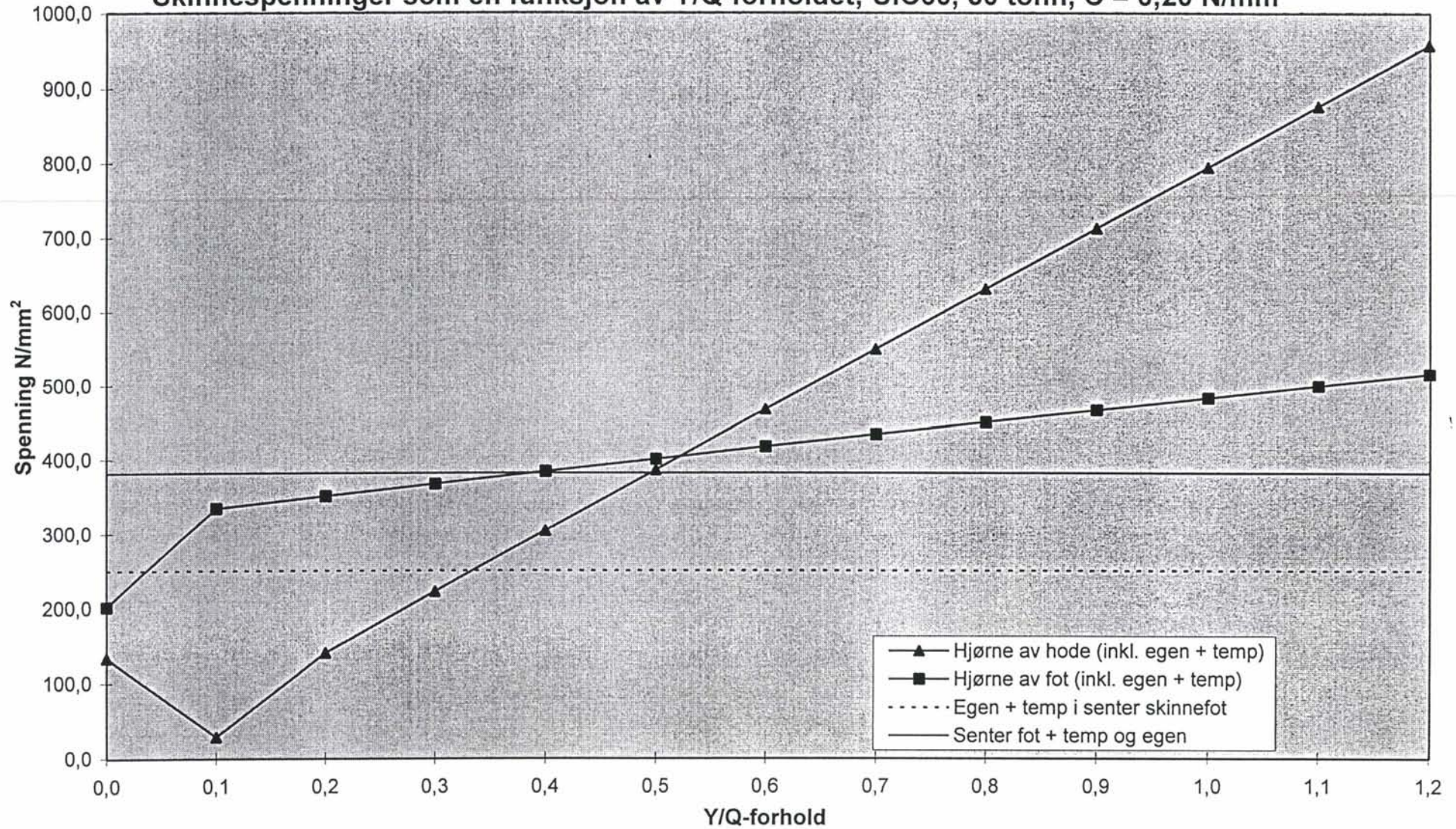
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 30 tonn, C = 0,20 N/mm³



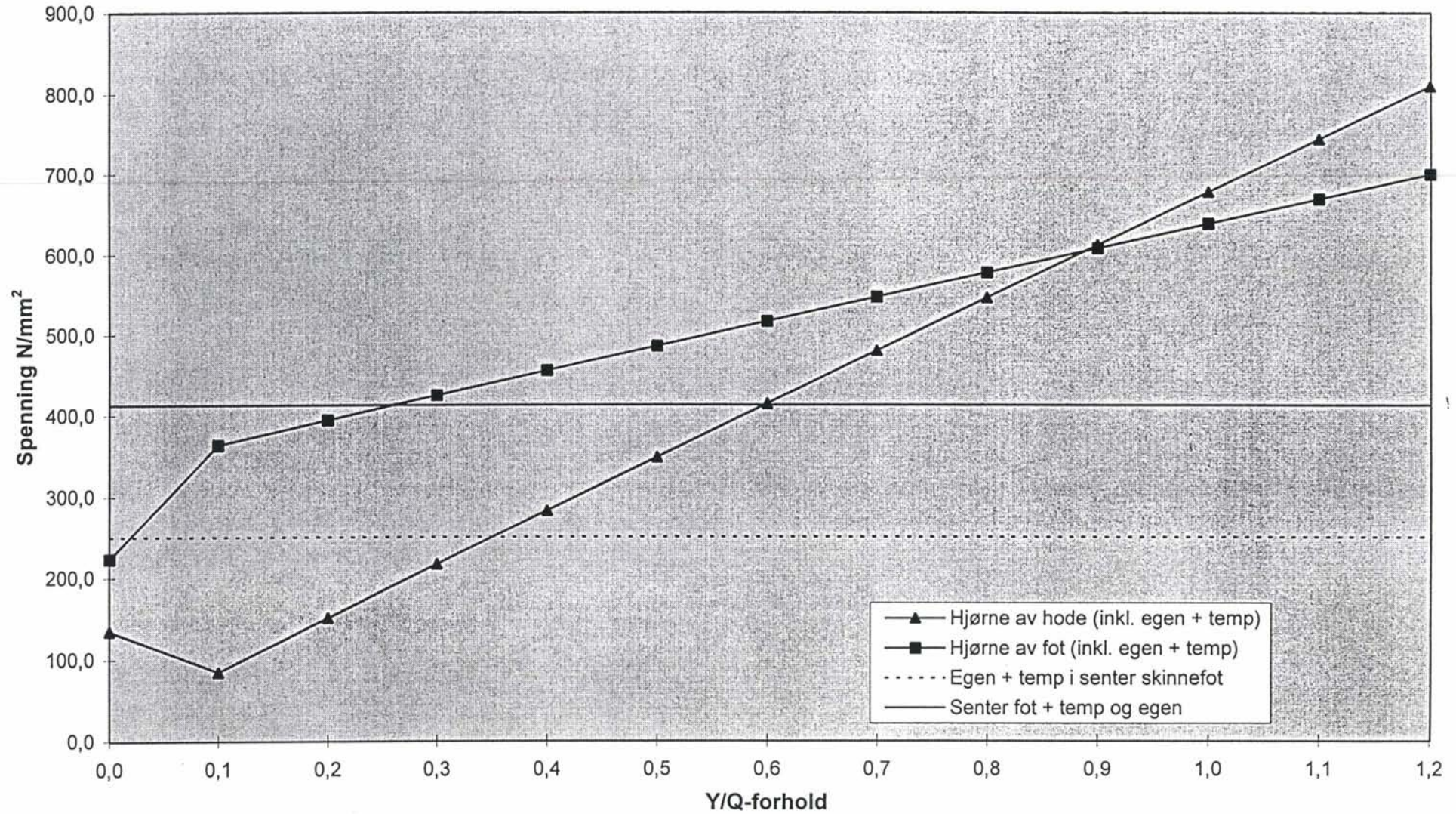
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 25 tonn, C = 0,20 N/mm³



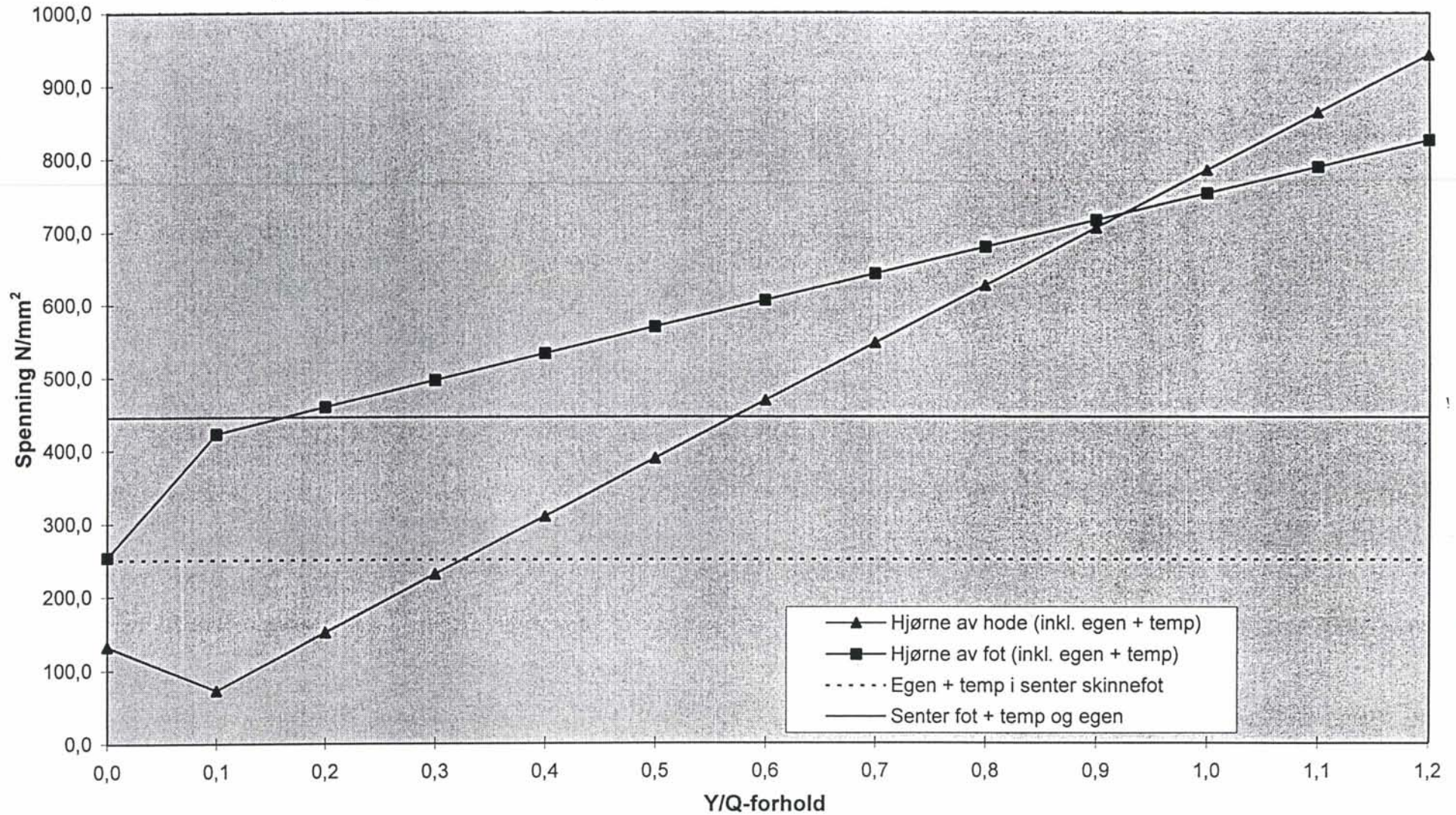
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 30 tonn, C = 0,20 N/mm³



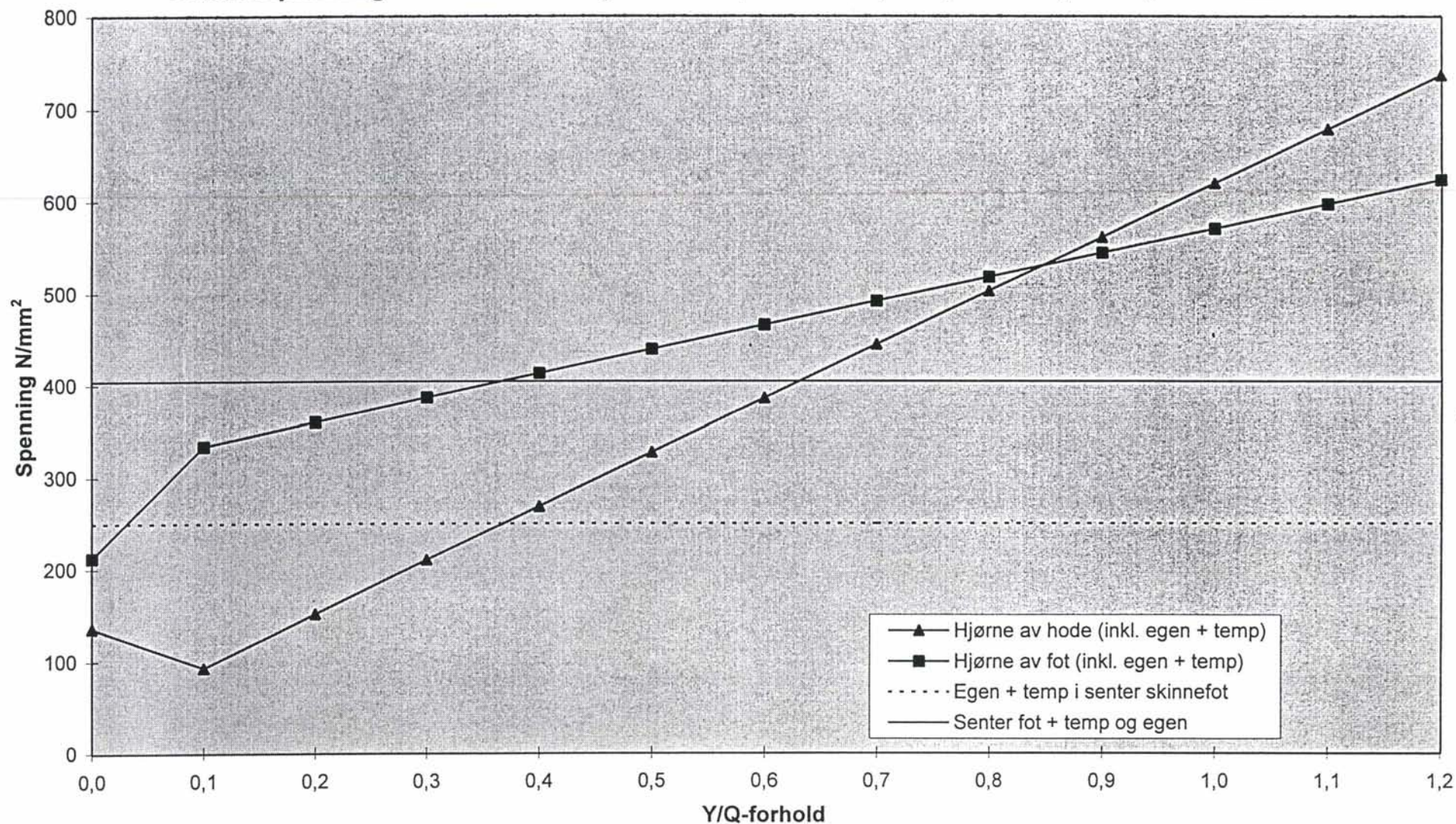
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 25 tonn, C = 0,15 N/mm³



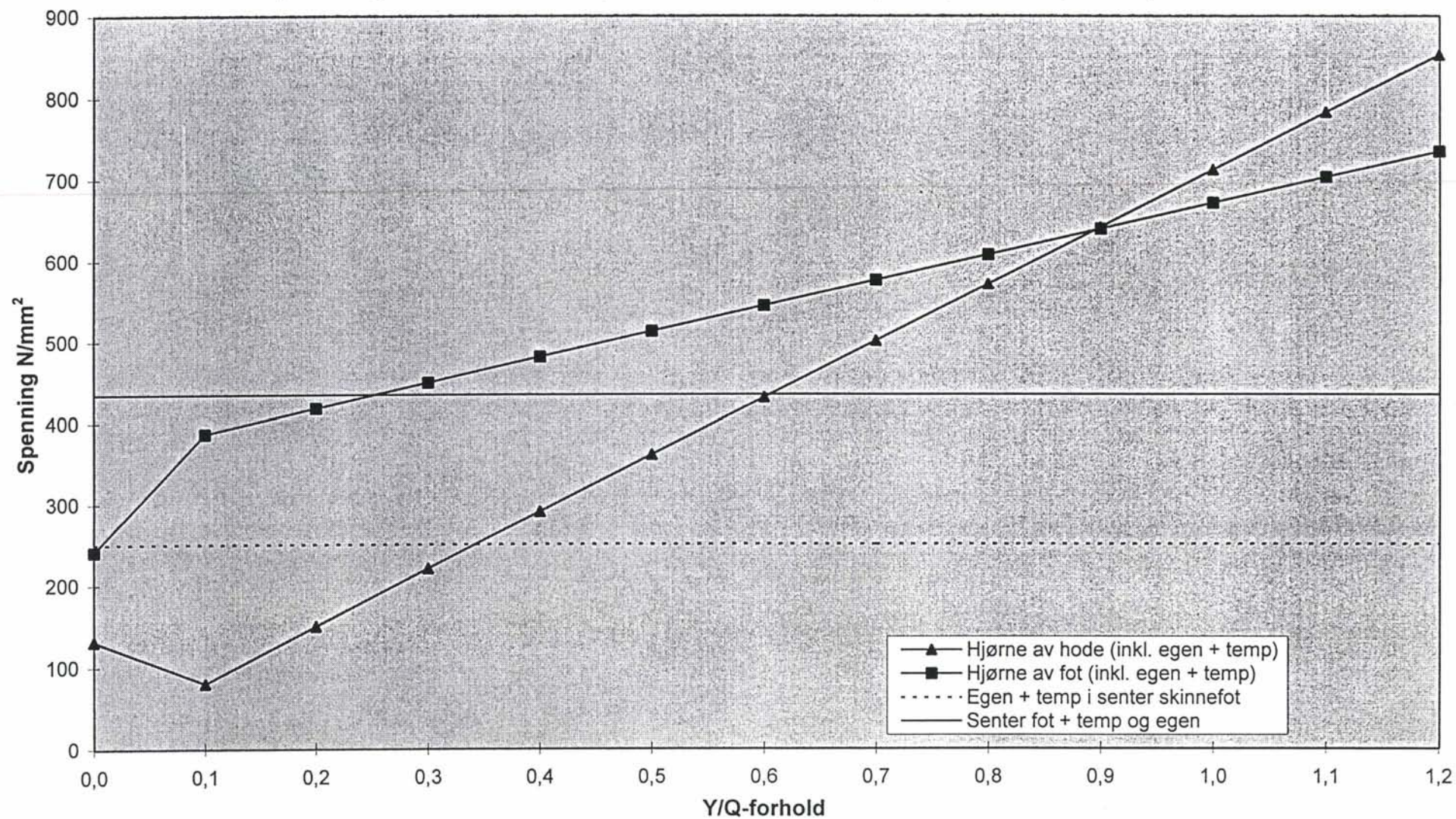
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S49, 30 tonn, $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$



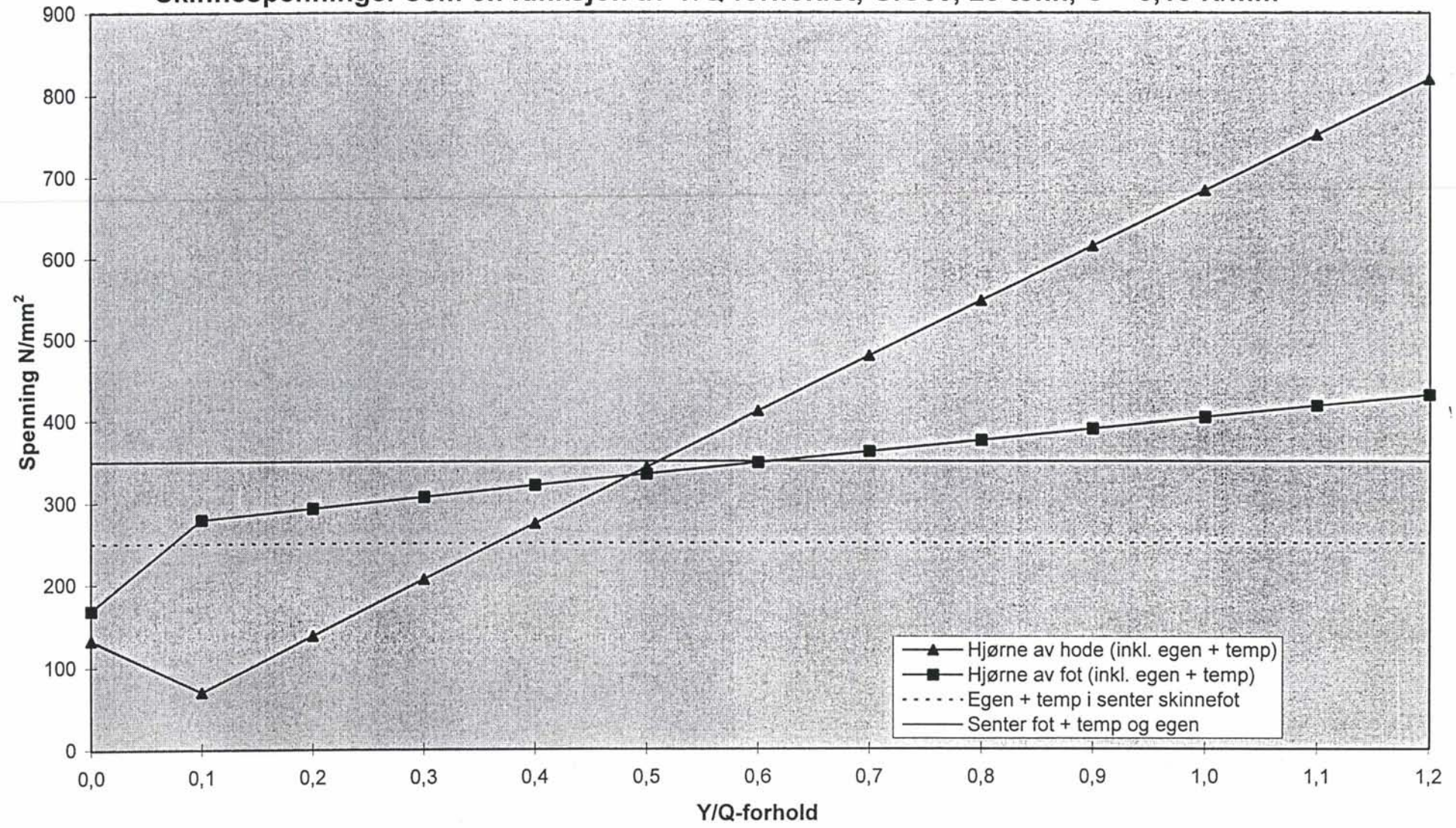
Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 25 tonn, C = 0,15 N/mm³



Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; S54, 30 tonn, C = 0,15 N/mm³



Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 25 tonn, C = 0,15 N/mm³



Skinnespenninger som en funksjon av Y/Q-forholdet; UIC60, 30 tonn, C = 0,15 N/mm³

