

Seminar
JBV Banedivisjonen
Region Øst
18.4.08



Krefter i helsveist spor

Per Herman Sørli (BRØ)

Innholdsfortegnelse

1	INNLEDNING	3
2	KREFTER I HELSVEIST SPOR	4
2.1	Helsveist kontra lasket spor	4
2.2	Aksialkraft i skinnen	4
2.3	Nøytraltemperatur	6
2.4	Pustepartiet	7
2.5	Spenningsbilde i helsveist spor	8
3	SPORETS MOTSTAND MOT FORSKYVNING SIDEVEIS	10
3.1	Kraftlikevekt i helsveist spor	10
3.2	Ballastskulderen	10
3.3	Ballastens kvalitet	11
3.4	Ballast i svillemellomrom	12
3.5	Innflytelse fra skinnene	12
3.6	Innflytelse fra svillene	12
3.7	Sporets rammestivhet	13
4	FAREMOMENTER	14
4.1	Flytting av sporet i kurver	14
4.2	Tilleggskrefter i sporveksler	15
4.3	Tilleggskrefter pga. bremsing	15
4.4	Tilleggskrefter ved bruer	16
4.5	Tilleggskrefter på grunn av skinnevandring	16
4.6	Justering og ballastrensing	17
4.7	Smal planering	18
4.8	Avlasting av sporet ved togpassering	21
5	SOLSLYNG	22
5.1	Faktorer som kan utløse solsl yng	22
5.2	Regnemetoder for beregning av knekktemperatur	22
5.3	Kritisk knekktemperatur	24
6	NØYTRALISERING	25
6.1	Definisjoner	25
6.2	Framgangsmåte	26
6.3	Reparasjon av skinnebrudd	26
7	BYGGING OG VEDLIKEHOLD AV HELSVEIST SPOR	28
7.1	Generelle råd	28
7.2	Problemkurver	29
7.3	Hvis solsl yng oppstår	29

1 Innledning

Helsveist spor kan defineres som et spor der skinnelengden er så lang at det oppstår et parti der spenninger pga. temperaturen låses inne og ikke kan utløses ved at skinnene utvider seg. Normalt snakker en om at et spor er helsveist når alle skjøter er sveist, slik at skinnen er sammenhengende over en lang strekning.

I et helsveist spor blir det låst inne betydelige krefter. Dette stiller igjen strenge krav til sporets motstand mot utglidning sideveis pga. trykkrefter ved høye temperaturer og skinnenes bruddsikkerhet ved lave temperaturer da det låses inne store strekkrefter.

Det må legges stor vekt på at alle som er ansvarlige for sporarbeider har de nødvendige kunnskaper om hvilke krefter som virker og hva man kan gjøre for å unngå uheldige utslag av disse kreftene, som f.eks. solslyng eller skinnebrudd vinterstid.

Dette notatet går inn på de kreftene som opptrer i det helsveisede sporet på grunn av temperaturendringer, på sporets sidemotstand og hva man kan gjøre for å forbedre den, gir noen eksempler på kritiske knekktemperaturer for JBVs sporkonstruksjoner (dvs. ved hvilke temperaturer det er sannsynlig at solslyng vil oppstå) og nøytralisering (spenningsfrigjøring). Det omfatter ikke metoder for sveising.

JBVs tekniske regelverk gir forskrifter for hvordan forskjellige arbeider skal utføres.

2 Krefter i helsveist spor

På tross av ulempene med solsllyng som nevnt ovenfor, byr det helsveistede sporet på en rekke fordeler i forhold til sporkonstruksjoner med lasket spor.

2.1 Helsveist kontra lasket spor

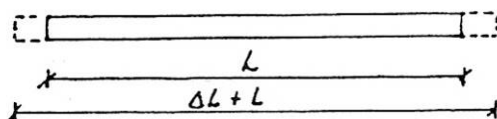
Skjøter i sporet medfører store påkjenninger på overbygningens komponenter i området ved skjøten noe som igjen gir et vanskelig og omfattende vedlikehold og dårlig komfort. Dessuten kan et lasket spor faktisk være mer utsatt for solsllyng enn et helsveist om det ikke vedlikeholdes riktig. Dette vedlikeholdet, som består av regulering av varmerom og oppsmøring av lasker for at de skal fungere etter hensikten, krever stor manuell arbeidsinnsats og i de senere årene har det rett og slett ikke vært nok folk til å utføre slike jobber. Mye av det laskede sporet har dermed ikke de varmerommene som skal til og oppfører seg tildels som et helsveist spor mhp. innelåste krefter. Problemet er at sporkonstruksjonene for lasket spor ikke er beregnet på å ta disse krefte-

ne. Det helsveistede sporet gir mindre vedlikehold og kan stort sett vedlikeholdes med maskiner, er en stivere og mer stabil konstruksjon og gir mindre slitasje både på spor og materiell sammen med en bedre komfort for passasjerene.

Ulempen er de store aksialkreftene som blir låst inne, men disse kan mestres om man bare gjør ting riktig.

2.2 Aksialkraft i skinnen

En skinne som ligger i en løs befestigelse kan betraktes som en fritt opplagt bjelke av stål. Når temperaturen endres vil skinnen utvide seg eller trekke seg sammen.



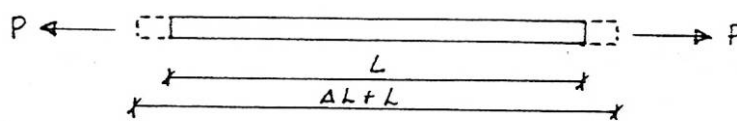
En temperaturendring medfører en lengdeendring L_t

$$\Delta L_t = k \cdot \Delta t \cdot L$$

hvor

k = utvidelseskoeffisient for stål $1,2 \cdot 10^{-5}$
 t = temperaturforskjell fra utgangssituasjon
 L = opprinnelig lengde

Tilsvarende vil skinnen forandre lengde hvis den blir strukket eller trykket sammen av en kraft.



En kraft medfører en lengdeendring ΔL_s

Denne lengdeendringen L_s kan uttrykkes ved:

$$\Delta L_s = \frac{s \cdot L}{E}$$

hvor

s = spenning = kraft/tverrsnittsareal

E = elastisitetsmodul for stål $2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$

L = opprinnelig lengde

Et helsveist spor kan betraktes som en fast innspent stålbejelke der "naboskinnene" låser skinnen slik at den ikke kan utvide seg eller trekke seg sammen. Utvidelsen som skulle kommet etter den første formelen må dermed forvandles til en spenning etter den andre formelen.

En kan altså sette:

$$\Delta L_t = \Delta L_s$$

som kan løses slik at en får spenningen i skinnene avhengig av temperaturvariasjonen:

$$s = k \cdot E \cdot \Delta t$$

Størrelsen på skinnespenningen i et helsveist spor varierer altså kun med temperaturen. Lengden av det helsveiste sporet har ingen betydning.

Setter en inn verdiene for de enkelte faktorene får en følgende enkle formel for spenningen i en skinne ved en temperaturforskjell Δt fra nøytraltemperaturen t_N (den spenningsfrie temperaturen):

$$s = 2,52 \cdot \Delta t \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$P = 2,52 \cdot A \cdot \Delta t \text{ [N]}$$

Aksialkraften fås ved å multiplisere med arealet av skinnen:

En skinne type S49 har et tverrsnittsareal på 6297 mm². For hver °C temperaturforskjell fra nøytraltemperaturen fås dermed en kraftøkning på ca. 15,9 kN, eller ca. 1,6 tonn.

Hvis man antar at skinnen er spenningsfri ved +20°C vil man altså ved en skinnetemperatur på +50°C (ikke uvanlig) få en trykkraft pr. skinne (S49) på 48 tonn eller i sporet (to skinner) 96 tonn. Tilsvarende gir lave vintertemperaturer høye strekkrefter. Dette tilsvarer omtrent at et 6-akslet lokomotiv skulle balansere på toppen av en skinnestige!

Det er altså betydelige langsgående krefter tilstede i sporet, både ved høye og lave temperaturer. Utknekking pga. trykkspenninger om sommeren hindres av ballastens motstand og av skinnenes treghetsmoment pluss vridningsmotstanden skinne/sville. Skinnebrudd vinterstid pga. strekkspenninger motvirkes ved å velge skinnestål med høyest mulig duktilitet.

Det sier seg selv at valget av spenningsfri temperatur, eller "nøytraltemperatur", er svært viktig og at det er viktig å opprettholde denne etter at sporet er bygd.

2.3 Nøytraltemperatur

Nøytraltemperaturen er den temperatur hvor skinnene skal være spenningsfrie. Ved JBV er $t_N = +21^\circ\text{C}$.

Nøytraltemperaturområdet er toleransen for hvor man kan legge nøytraltemperaturen ved sluttveising av sporet. Ved JBV fra +18°C – +24°C.

Nøytraltemperaturen kan synes høy i forhold til de middeltemperaturene vi har i luften i Norge. Imidlertid når skinnetemperaturen ofte så høyt som +55°C om sommeren. Laveste temperatur kan nå ned i –40°C. Maksimale temperaturforskjeller fra nøytraltemperaturen er dermed ca. +37°C og –64°C. Strekkreftene skinnene utsettes for vinterstid er altså mye høyere enn trykkreftene som opptrer om sommeren. Sporet tåler imidlertid mer strekk enn trykk.

Konsekvensen av for store trykkspenninger er solslyng, mens strekkspenningene kan gi skinnebrudd. Begge *kan* ha store konsekvenser i form av f.eks. avsporinger, men risikoen for avsporing pga. solslyng er vesentlig større enn ved skinnebrudd. Det er derfor meget viktig at nøytraltemperaturen holdes innenfor det foreskrevne området slik at spenningene begrenses mest mulig.

På grunn av de store temperaturforskjellene er Norge et ugunstig land for helsveising av spor. I tillegg har vi svært mange skarpe kurver og trange fyllinger, noe som gjør at ballastkantene og dermed sidemotstanden ikke er så god som den burde være. Ut fra vurderinger av konsekvensene er det naturlig å legge seg på en relativt høy nøytraltemperatur og et meget snevert nøytraltemperaturområde.

I land med mindre forskjell mellom høyeste og laveste temperatur kan man ha vesentlig større tillatt nøytraltemperaturområde uten at dette har noen særlig negativ effekt. De Sør-Afrikanske jernbanene regner for eksempel med at skinnets temperaturen holder seg innenfor $+10 - +60^{\circ}\text{C}$ og nøytraltemperaturområdet er $+15 - +40^{\circ}\text{C}$.

Av det ovenstående kan en utlede at for høy nøytraltemperatur fører til økt risiko for skinnebrudd vinterstid og at for lav fører til økt risiko for solslyng om sommeren. Et par regneeksempler for S49 om en forutsetter at nøytraltemperaturen skulle vært $t_N = +20^{\circ}\text{C}$:

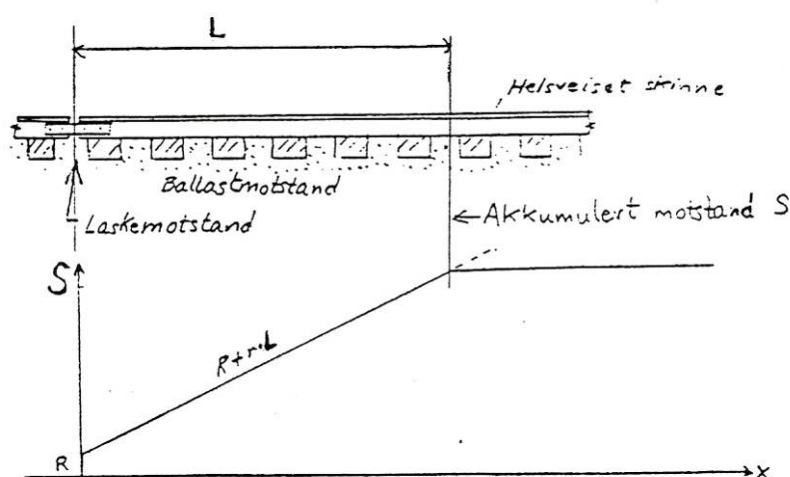
- $t_N = +10^{\circ}\text{C}$ betyr ekstra trykkraft i sporet ved høye temperaturer på 32 tonn, eller en total kraft ved $t = +55^{\circ}\text{C}$ på 144 tonn mot forutsatt 112 tonn.
- $t_N = +30^{\circ}\text{C}$ betyr en ekstra strekkraft i sporet ved lave temperaturer på 32 tonn, eller en total kraft ved -40°C på 224 tonn, dvs. 112 tonn pr. streng. Skinnespenning pga. temperaturforskjellen blir 178 N/mm^2 for S49.

For å begrense risikoen for solslyng eller skinnebrudd er det altså viktig å sørge for en riktig nøytraltemperatur under byggingen av sporet og at denne nøytraltemperaturen opprettholdes senere. Det første sørger en for ved nøyaktig arbeide, det siste ved hjelp av varig utfesting av linjen og riktig utførelse av sporvedlikeholdet.

Arbeidsmetodene ved nøytralisering av sporet beskrives i et senere avsnitt.

2.4 Pustepartiet

I hver ende av et helsveist spor befinner det seg et parti som kalles "pustepartiet". I dette partiet bygges spenningen i det helsveiste sporet opp, slik som vist i figuren under.



Pustepartiet i enden av det helsveiste sporet.

Motstanden mot langsgående forskyvning i enden av det helsveiste sporet utgjøres av laske- motstanden og ballastmotstanden, dvs. den motstanden ballasten gir mot forskyvning av svillene langs sporet.

Lengden av pustepartiet kan uttrykkes ved:

$$L = \frac{S - R}{r}$$

hvor: S = kraft i helsveist spor
 R = laskemotstanden (kan regnes til 100 kN)
 r = ballastmotstanden (10 kN/m)

I pustepartiet kan det forekomme små bevegelser på grunn av at svillene beveger seg litt i ballasten for å bygge opp motstanden.

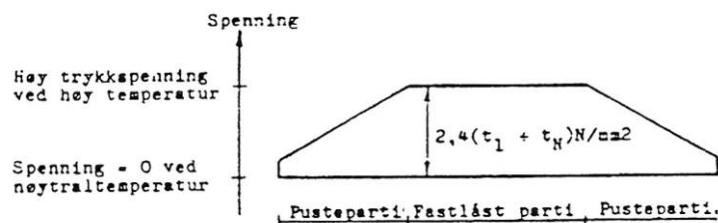
Dersom skinnene i pustepartiet beveger seg *i forhold til svillene*, vil det kunne føre til at skjøtene i det laskede sporet ved siden av ("overgangspartiet") blir tette ved for lav temperatur. Dette vil i så fall føre til økt solsløyngfare i dette partiet. Klemkraften fra skinnebefestningen skal normalt være stor nok til å hindre relativ bevegelse skinne/svill.

Bevegelse mellom skinne og sviller i pustepartiet i tresvillespor motvirkes ved å sette på skinne- stoppere. I betongsvillespor, hvor skinnestopperer ikke kan brukes, må en påse at befestigelsen er i orden. Det innebærer at det i pustepartiet er *spesielt* viktig å påse at isolatorer og mellomlegg er intakte slik at klemkraften på befestigelsen er opprettholdt.

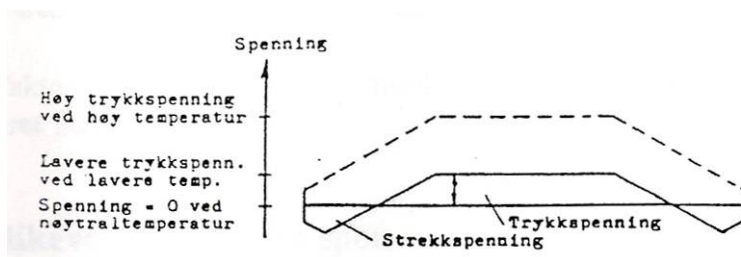
Lengden av pustepartiet vil varieres med temperaturen i det helsveiste sporet. Ved nøytral- temperatur +20°C og skinnetemperatur +55°C vil pustepartiets lengde være ca. 45 m om en setter inn verdiene i formelen ovenfor.

2.5 Spenningsbilde i helsveist spor

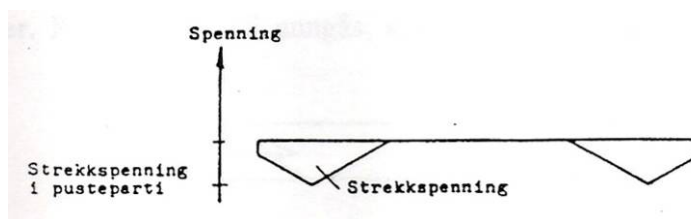
Spenningen inne i det helsveiste sporet sammen med nedtrappingen av spenningene i pustepar- tiet gir tilsammen et spenningsbilde som vist på de neste figurene.



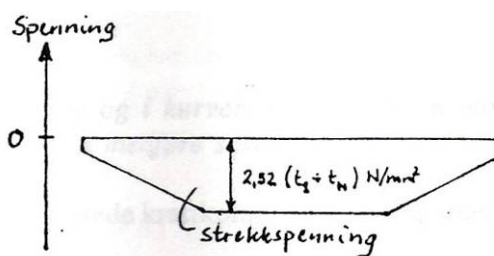
Spenninger i helsveist spor ved høy temperatur. En får trykkspenninger over hele lengden som så nedtrappes i pustepartiene.



Spenninger ved lavere temperatur, men over nøytraltemperaturen. En ser at en får innlåste strekkspenninger i pustepartiet grunnet ballastmotstanden.



Spenninger ved nøytraltemperaturen. Spenningen er null utenom pustepartiet hvor en har innlåste strekkspenninger.



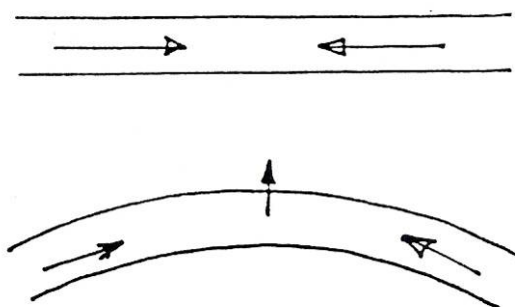
Spenningsbilde ved lav temperatur. Strekkspenninger over hele lengden som nedtrappes i pustepartiene.

3 Sporets motstand mot forskyvning sideveis

Det er flere faktorer som har betydning for hvilke krefter som oppstår sideveis og hvor stor motstand sporet har mot disse.

3.1 Kraftlikevekt i helsveist spor

I helsveist spor er det, som vist, store langsgående krefter. I rett spor uten baksefeil er det ingen kraftkomponent på tvers av sporet, men i kurver og ved pilhøydefeil fås det en resultant som peker utover. Pilhøydefeil må unngås, spesielt i kurver, da disse virker utløsende på solsløng.



Krefter på rettlinje og i kurver. I kurve fås en utoverrettet komponent som kan medføre solsløng.

Det som virker *mot* denne utoverrettede kraftkomponenten er sporets sidemotstand som består av:

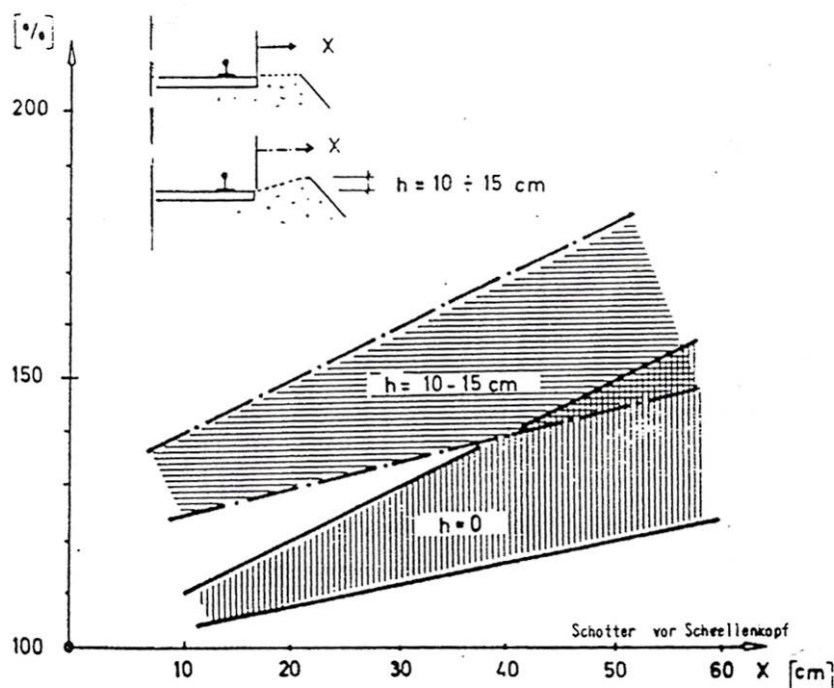
- * Friksjon sville/ballast
- * Ballastskulderen
- * Skinnenenes egen stivhet sideveis
- * Dreiemotstand skinne/sville

Sidemotstanden og de faktorene som bedrer eller forverrer denne beskrives nærmere i det følgende.

3.2 Ballastskulderen

Denne er en kritisk faktor for størrelsen på sporets sidemotstand. Ved JBV er det mange steder smal planering og det kan det ofte være et problem å få til tilstrekkelig bredde på ballastskulderen.

Av figuren på neste side kan en lese ut skulderens innflytelse på sporets sidemotstand. Økt bredde på ballastskulderen virker positivt, men enda viktigere er skulderens form. En ekstra opphopning av ballast på skulderen virker meget positivt på sidemotstanden.



Sidermotstand som funksjon av skulderbredde utenfor svillende og form på skulderen.

Eksempler:

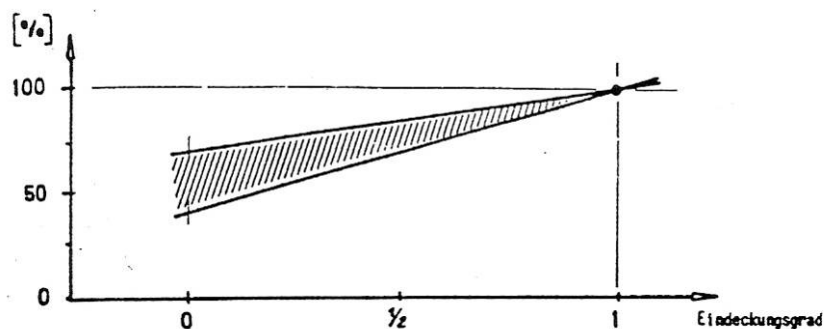
- En økning av skulderbredden fra 40 til 55 cm betyr en økning av sporets sidermotstand på ca. 10%.
- En økning av høyden på ballastskulderen fra 0 til 10 cm betyr en økning av sporets sidermotstand på ca. 20%.

Et spesielt problem er varierende skulderbredde i kurven, noe som gir forminskert sidermotstand. Forsøk har vist at hvis skulderbredden over bare 5 – 6 m er vesentlig mindre enn i resten av kurven vil virkningen bli at sidestabiliteten forverres i hele kurven. Dette gjelder spesielt i kurver med liten radius ($R < 500$ m).

3.3 Ballastens kvalitet

Ballastens egenskaper mhp. indre friksjon, kornstørrelser etc. er viktig. Knust kubisk stein er best. En stor andel flisig materiale setter ned motstanden med ca. 10%. Pukk er ca. 30% bedre enn naturlig grov grus. Forurenset ballast har vesentlig lavere sidermotstand enn en ren ballast

3.4 Ballast i svillemellomrom



Innvirkning på sidemotstanden fra ballasten i svillemellomrommene.

Ballasten i svillemellomrommene bidrar sterkt til sporets sidemotstand og utgjør 40–50% av sidemotstanden i spor med tresviller og ca. 30% i et betongsvillespor.

3.5 Innflytelse fra skinnene

Skinnenes treghetsmoment sideveis har vesentlig innflytelse på sporets motstand mot utknekking. Samtidig øker aksialkraften i sporet etterhvert som skinneprofilet blir større. Det ønskelige ville være en skinne med svært bred fot for å øke treghetsmomentet sideveis maksimalt, men valseteknikken setter grenser for hva det er mulig å oppnå.

Hvis ikke skinnens treghetsmoment øker i samme takt som vekten, vil en tyngre skinne være farligere med hensyn på solslyng enn en lett skinne pga. de større aksialkreftene. Hvis en sammenligner kraften i en skinne S49 med andre profiler, finner en at aksialkraften i en 35 kg/m skinne er 28% lavere, mens en 54 kg/m skinne har 10% høyere aksialkraft ved samme temperatur. På grunn av at skinnenes treghetsmoment varierer blir imidlertid forholdet mellom skinnene mhp. solslyngfare (knekktemperatur) slik i forhold til S49:

35 kg/m	–2%
S54	+4%
UIC60	–4%

hvor + representerer en forverring og – en forbedring.

3.6 Innflytelse fra svillene

Svilletypen har stor innflytelse på sporets sidemotstand. Et spor med betongsviller er ca. 60% bedre enn et spor med tresviller. Dette kommer av betongsvillenes større vekt og formen med innsvingt midtparti.

Svilleavstanden har også betydning. En forminskning av svilleavstanden fra 65 til 60 cm medfører en økning i sidemotstanden på ca. 8%.

3.7 Sporets rammestivhet

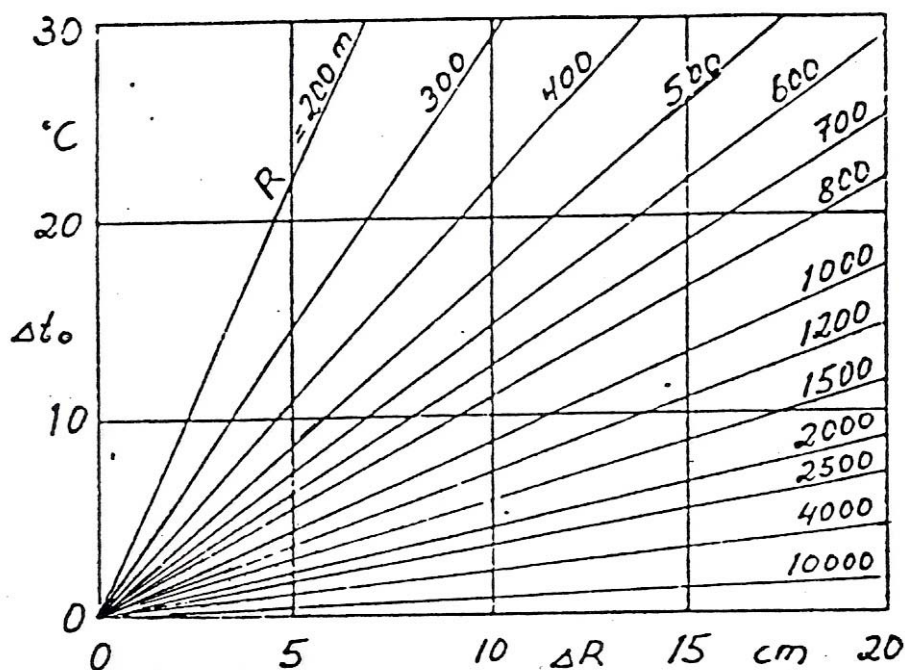
Sporets rammestivhet avhenger av typen befestigelse og fastspenningsgraden, dessuten av typen mellomlegg. Befestigelsene JBV bruker er fullt på høyde med de andre typene som er i bruk i Europa.

4 Faremomenter

En kan påvirke sporets stabilitet i negativ retning gjennom både arbeidsoperasjoner og manglende oppfølging. Dessuten er det spesielle farepunkter i sporet som man må ta hensyn til.

4.1 Flytting av sporet i kurver

Dersom sporet flyttes inn eller ut i kurver, vil skinnelengden og dermed nøytraltemperaturen endres. En får "for mye" eller "for lite" skinne i kurven. Flyttes sporet utover blir skinnelengden større, og nøytraltemperaturen går opp. Resultatet kan bli for høye skinnespenninger vinterstid. Flyttes sporet inn i kurven blir skinnelengden mindre og nøytraltemperaturen går ned. Skinnespenningene blir dermed høyere om sommeren med økt solslyngrisiko som følge.



Endring i nøytraltemperaturen for sporet som følge av ensidig baks i en kurve avhengig av kurveradius.

Som en ser av figuren ovenfor blir forholdene verre jo mindre kurveradius en kurve har. Ved $R = 300$ m og en ensidig flytting av sporet på 7 cm endres nøytraltemperaturen med 20°C , mens samme baks i kurveradius 1000 m betyr en endring på 6°C .

Problemet med at sporet flytter seg inn i kurver er utbredt ved JBV og skyldes bl.a. sporjustering ved lave temperaturer. Strekkraftene i sporet er da så store at justeringsmaskinene ikke klarer å legge sporet tilbake på samme sted, spesielt i skarpe kurver med stor overhøyde. Over noen år kan dette føre til store forskyvninger og dermed sterkt økt risiko for solslyng (jfr. fig. ovenfor).

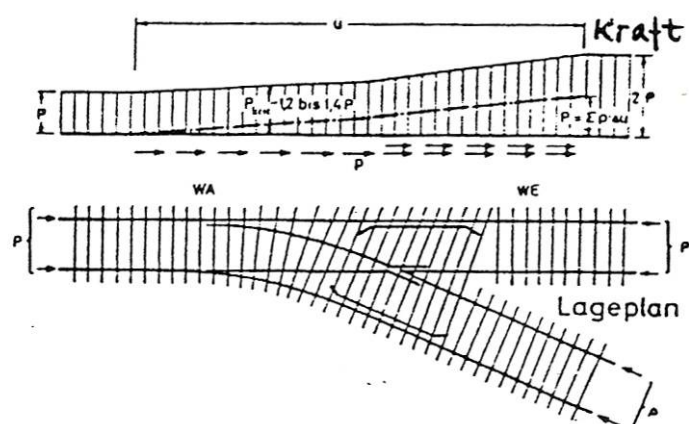
Varig utfesting av linjen er svært viktig i denne sammenhengen for å kunne bakse sporet tilbake på plass og for å kunne kontrollere om sporet har flyttet seg.

I forskriftene er det gitt regler for ved hvor lave temperaturer det er tillatt å justere sporet i kurver. Generelt må man være meget forsiktig med justering i skarpe kurver for å unngå at sporet flyttes inn.

En regner med at varig utfesting av linjen hever sikkerhetsnivået vesentlig over tid og det kan anslås en bedret sikkerhetsmargin på 10 – 15°C.

4.2 Tilleggskrefter i sporveksler

I en sporveksel ledes kreftene fra to spor inn i ett og aksialkreftene øker derfor med opptil 40% i stokkskinnen.



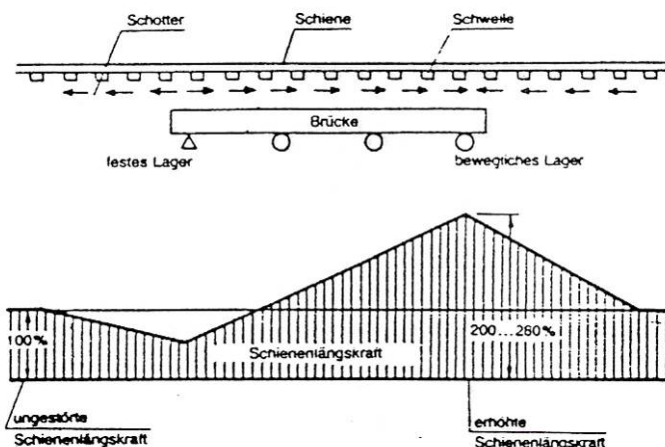
Aksialkrefter i sporveksler. I stokkskinnen øker kraften med opptil 20%.

Kraftøkningen kan føre til problemer med solsløng i sporveksler noe som kan motvirkes med svilleankre og/eller tyngre sviller.

4.3 Tilleggskrefter pga. bremsing

Når et tog bremses eller akselerer blir det ledet langsgående krefter inn i skinnene. Disse kan tilsvare en endring i nøytraltemperaturen på opptil ca. 6 °C.

4.4 Tilleggskrefter ved bruer



Aksialkrefter i sporet ved bevegelig lager på betongbruer med gjennomgående ballast uten glideskjøter.

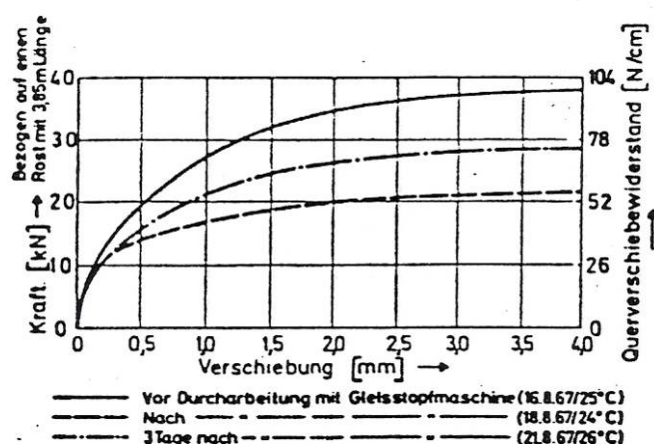
På betongbruer med gjennomgående ballast uten glideskjøt blir det store tilleggskrefter i skinnene. Dette skyldes bruas utvidelse mot det bevegelige lagret. Ballastmotstanden trekker svillene, og dermed skinnene, med seg og en kan få en dobling av skinnespenningene ved bevegelig lager.

4.5 Tilleggskrefter på grunn av skinnevandring

På steder hvor det til stadighet er kraftig oppbremsing kan skinnevandring forekomme, f.eks. foran signaler eller på lange strekninger med fall. Denne skinnevandringen fører til at en får "oppnopning" av skinner enkelte steder med derav følgende økte skinnespenninger og økt risiko for solslyng.

I denne forbindelsen er det viktig å sørge for at befestigelsens klemkraft er i orden, dvs. at slitte isolasjonsdeler må byttes ut i Pandrol-befestigelse og at hey-back klemmer byttes ut når de er avspent. En må vurdere jevnlig nøytralisering på problempunkter der man av erfaring vet at solslyng dukker opp.

4.6 Justering og ballastrensing



Justeringsarbeidenes innflytelse på sporets sidemotstand.

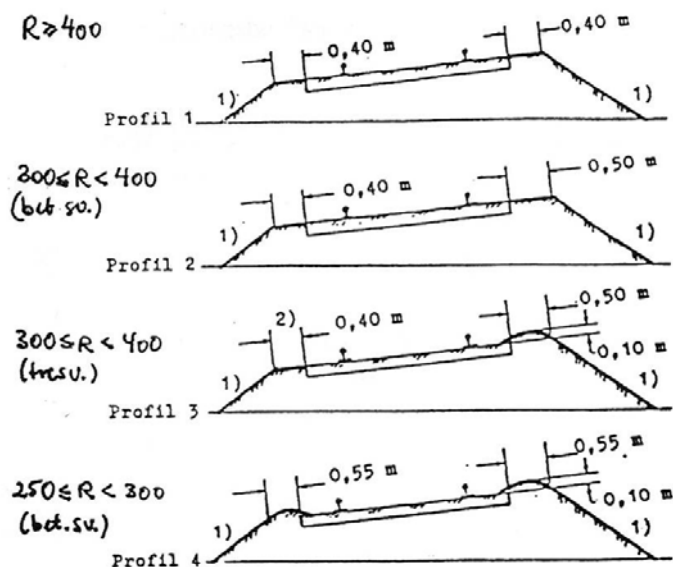
Figuren viser at sporets sidemotstand reduseres med ca. 50% rett etter justering med pakkmaskin i forhold til et konsolidert spor. Dette er årsaken til at det settes begrensninger mhp. justeringsarbeider ved høye temperaturer. Etter ballastrensing er forholdene enda verre og sidemotstanden er redusert med ca. 70%.

Full sidemotstand oppnås ikke før etter ca. 150.000 passerte bruttotonn, men forholdene er vesentlig bedret allerede etter ca. 50.000 brt. På JBV's hovedlinjer vil det si etter 3–6 dager. I tiden som går før sidemotstanden er gjenopprettet bør man vurdere saktekjøring i skarpe kurver ved høye temperaturer.

Komprimering av ballasten etter arbeider med justering eller ballastrensing har god virkning. Om bare ballastkanten komprimeres, øker det sidemotstanden med 10–20%, mens komprimering av både ballastkant og svillemellomrom øker motstanden med 30–50%. Bruk av dynamisk sporstabilisator, som vibrerer hele overbygningen, tilsvarer ca. 60–80.000 passerte brt. og er den beste metoden, men også den dyreste pga. utstyrets pris.

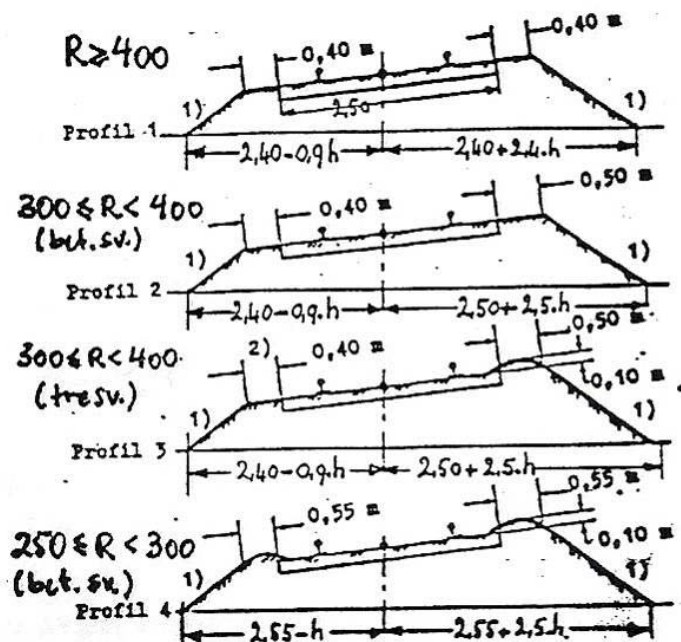
4.7 Smal planering

JBVs forskrifter har tatt hensyn skulderbreddens innflytelse på sporets sidemotstand ved å spesifisere skulderbredder og opphopning av ballast på skulderen for forskjellige kurveradii i forskriftene.



JBVs forskrifter for skulderbredder avhengig av kurveradius.

Dessverre viser det seg at planeringsbreddene ved JBV ofte umuliggjør forskriftsmessige skuldre, jf. de neste figurene:

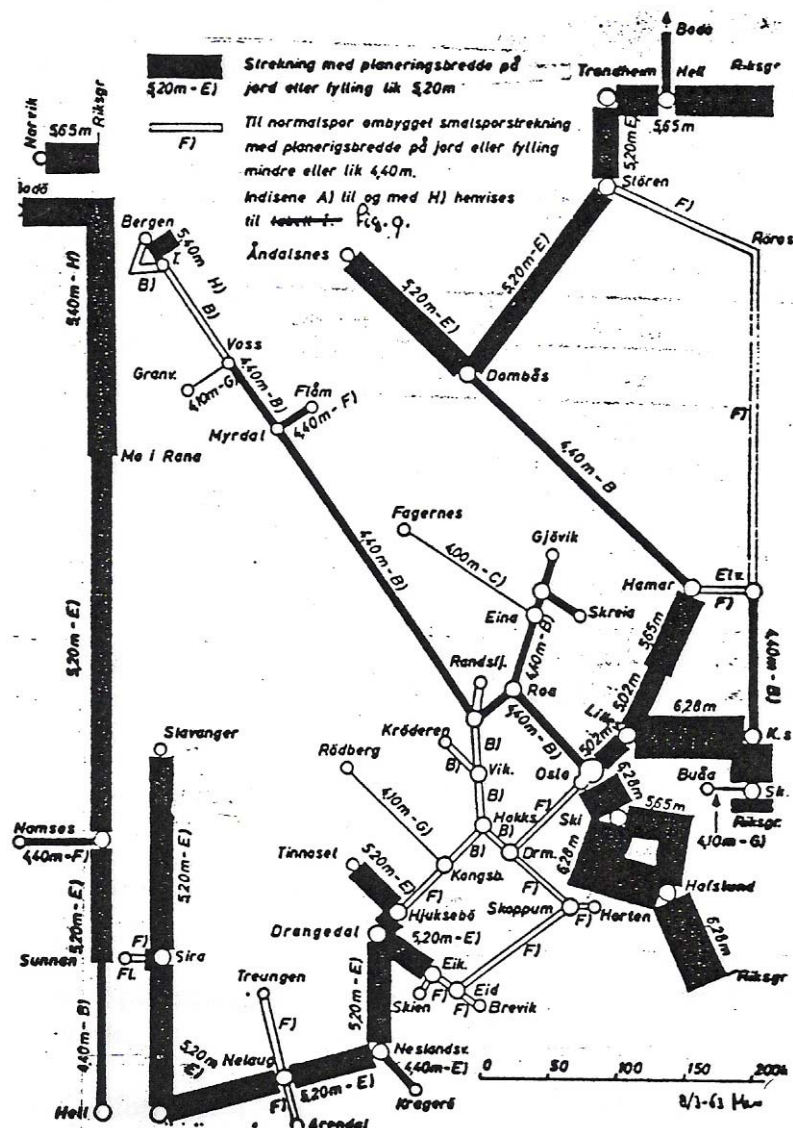


Nødvendige planeringsbredder for å oppnå skulderbredder iht. forskriftene.

Ved å sette inn tall for overhøyder i formlene i figuren ovenfor kan en finne nødvendige planeringsbredder for å oppnå skulderbredder etter forskriftene i spor med betongsviller:

- * $R = 400 \text{ m}$ og $h = 140 \text{ mm}$; planeringsbredde minst $5,03 \text{ m}$
- * $R = 300 \text{ m}$ og $h = 150 \text{ mm}$; planeringsbredde minst $5,14 \text{ m}$
- * $R = 250 \text{ m}$ og $h = 150 \text{ mm}$; planeringsbredde minst $5,33 \text{ m}$

Figuren under viser hvilke planeringsbredder de forskjellige banene opprinnelig er bygget med.



Planeringsbredder ved JBV's baner. De baner som er anlagt som smalspor er senere bygget om med planeringsbredde 4,4 m med utvidelse i kurver.

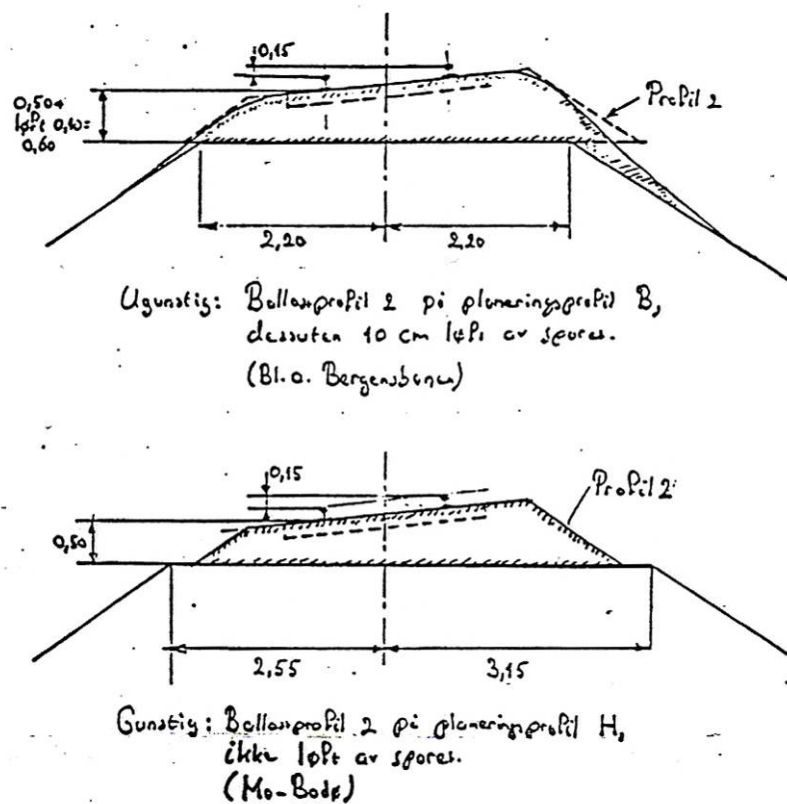
Som en ser av kartet er svært mange baner bygget med et planeringsprofil som egentlig er utilstrekkelig for sveising i skarpere kurver. Forutsetter man en ballasttykkelse på 30 cm mellom planering og sviller finner man at det strengt tatt er begrensinger i minste kurveradi som kan helsevises for følgende baner som har planeringsbredde 4,4 m uten utvidelse i kurver:

$R_{\min} = 400 \text{ m}$

Oslo–Roa–Gjøvik/Bergen
Drammen–Hønefoss/Kongsberg
Hamar–Dombås
Hell–Steinkjer

Når det senere er utført løft av sporet er forholdene blitt verre og flere baner har egentlig begrensninger i hvor helseveist spor kan bygges i henhold til forskriftene.

I tillegg kommer en del ombygde smalsporbaner som Vestfoldbanen og Randsfjordbanen som i teorien skulle ha planeringsbredde 4,4 m med utvidelse i kurver, men hvor sparehensyn har gjort seg gjeldende under ombyggingen.



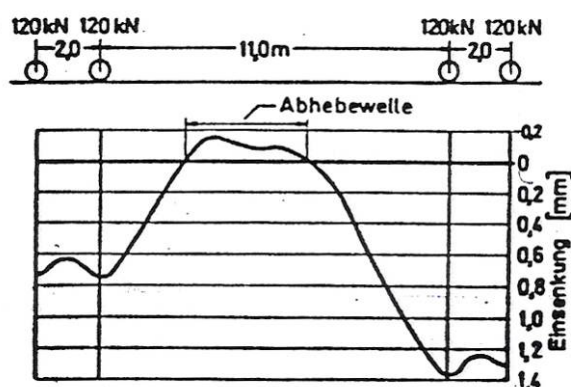
*Ballastprofil 2 plassert på fyllingsbreddene 4,4 m og 5,7 m.
På 4,4 m får ikke skulderen støtte og er ustabile.*

Det som skjer når en forsøker å fylle på ballast for å oppnå tilstrekkelige skulderbredder ved smal planering, er at ballasten renner nedover fyllingen. En oppnår kanskje tilstrekkelig bredde, men ballastkanten får meget dårlig støtte og ligger i for bratt vinkel slik at den blir ustabil. Figuren under viser forholdene ved planeringsbredder 4,4 m (f.eks. Bergensbanen og 5,7 m (Mo–Bodø).

Mange av JBVs baner er helsveist i strid med forskriftene, men det ville være tvilsomt å gå tilbake til lasket spor på disse banene. De beste rådene en kan gi er å

- unngå ytterligere løft på smale fyllinger
- vurdere å senke sporet på fylling
- vurdere fyllingsutvidelser for å gi bedre skulder.
- sørge for å holde kontroll med nøytraltemperaturen vha. varig utfesting av sporet og nøytralisering.

4.8 Avlasting av sporet ved togpassering



Skinnens bøyelinje under en passerende vogn.

Når materiell kjører langs sporet dannes det en løftebølge foran og bak enkeltaksler eller boggier. Denne medfører et løft som kan være så stort at sporet faktisk løftes klar av ballasten med et par tiendedels mm. Jo tyngre sporet er, jo mindre løftes sporet og betongsviller er derfor gunstigere enn tresviller.

Det er påvist at løftebølgen kan redusere sporets totale sidemotstand med 30%. Av den grunn kan solslyng ofte utløses under passerende tog.

5 Solslyng

Solslyng oppstår når den tverrgående komponenten av temperaturkreftene i skinnene overstiger sporets sidemotstand.

5.1 Faktorer som kan utløse solslyng

På rettlinje og i svake kurver er den tverrgående komponenten av langskreftene i skinnene svært liten. Skal det bli fare for solslyng må det være tilstede en viss initiell retningsfeil som medfører en kraftkonsentrasjon. I skarpe kurver er forholdene annerledes i og med at den tverrgående komponenten i utgangspunktet er større. Mindre variasjoner i sporets sidemotstand kan der utløse solslyng, siden kreftene alltid finner «den letteste veien».

Følgende faktorer er viktige:

- Store retningsfeil i sporet. Disse kan skyldes f.eks. dårlig undergrunn, tvangspunkter i sporet som planoverganger eller bruer og overgang mellom justert og ujustert spor.
- Spenningstopper i sporet. Disse kan skyldes f.eks. uriktig gjennomførte nøytraliseringsarbeider, feilaktig innsveising av skinnekapp etter skinnebrudd, at sporet har flyttet seg inn i kurver, spenningstopper ved sporveksler, eller skinnevandring på steder der tog bremser.
- Nedsatt sidemotstand. Dette kan skyldes f.eks. sporjustering eller andre arbeider i sporet eller for smalt ballastprofil.
- Nedsatt rammestivhet i sporet. Dette kan skyldes f.eks. løse skinnebefestigelser.

Ved togpassering er som tidligere nevnt sidemotstanden nedsatt pga. løftebølgen foran/under toget. Dette kan utløse solslyngen pga. en eller flere av faktorene ovenfor.

5.2 Regnemetoder for beregning av knekktemperatur

Den mest brukte beregningsmetoden for beregning av kritisk knekktemperatur i ubelastet spor stammer med enkelte tilpasninger fra 1930-tallet og professor Meier. Denne gjør svært forenklete tilnærminger, men praktiske erfaringer og teoretiske beregninger etter mer avanserte metoder har vist at den er tilstrekkelig nøyaktig for praktisk bruk bare beregningsforutsetningene er rimelige.

For kurver med mindre radier enn 500 m oppstår det et fenomen som kalles «kurvepusting» hvor sporet flytter seg jevnt utover i kurven etterhvert som temperaturen øker. For de mindre kurveradiene er det derfor blitt hevdet at metoden gir noe for ugunstige resultater. En forutsetning for dette er imidlertid at ballastmotstanden er jevn, noe den ikke alltid er. Praktiske forsøk har vist at «kurvepusting» bare utgjør ca. 1–2 mm og den er derfor i praksis uten betydning.

Formelen tar utgangspunkt i en initiell retningsfeil i sporet som beskrevet ovenfor og det gjøres en beregning av den kritiske temperaturforskjellen fra nøytraltemperatur. Utledning av formelen beskrives ikke nærmere her, men den ser ut som vist under for spor i kurver (ensidig utkneking):

$$\Delta t_{kr} = \frac{\sqrt{\left(\frac{8 EI_y}{Rf_0}\right)^2 + \frac{16 BEI_y}{Df_0}} - \frac{8 EI_y}{Rf_0}}{\alpha AE} k_1 k_2$$

hvor:	EI_y	=	vertikal stivhet for to skinner
	E	=	elastisitetsmodul for stål
	I_y	=	vertikalt treghetsmoment
	A	=	tverrsnittsareal to skinner
	B	=	sidemotstand fra ballasten
	D	=	svilleavstand
	R	=	kurveradius
	α	=	stålets utvidelseskoeffisient
	f_0	=	initiell baksefeil
	k_1	=	korreksjon for ballastens konsolideringsgrad
	k_2	=	korreksjon for virkning av løftebølge

Kritisk knekktemperatur blir da:

$$T_{kr} = T_0 + \Delta t_{kr}$$

hvor:	T_0	=	forutsatt nøytraltemperatur
-------	-------	---	-----------------------------

Det har vist seg at en tilnærming med «løs befestning» gir de riktigste resultatene. Det vil si at en beregningsmessig ikke tar hensyn til dreiemotstanden mellom skinne og sville. Dette er det tatt hensyn til i formelen ovenfor.

Sammenligning av Meiers metode med mer avanserte beregninger og praktiske forsøk tyder på at det det er riktigst å benytte en verdi for initiell baksefeil f_0 på 5 mm.

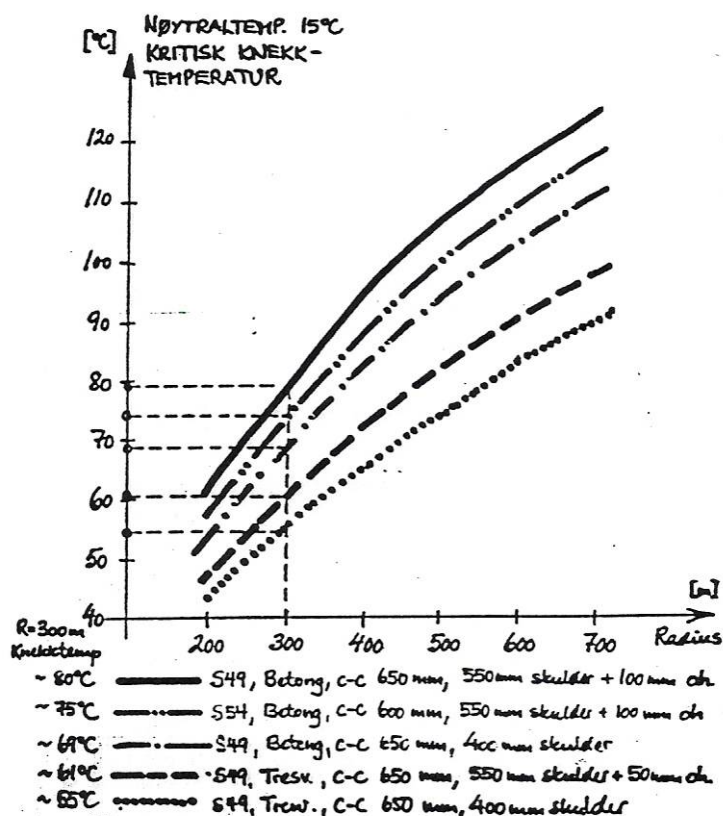
Ballastens sidemotstand er den uten sammenligning viktigste parameteren ved stabilitetsberegninger. Denne må fastsettes eksperimentelt for hver sporkonstruksjon. Så lenge en opererer med løs befestning som nevnt tidligere, er det svillens utforming, svilleavstanden og ballastprofilen som avgjør denne. Som eksempel på aktuelle verdier kan det opplyses at ved svilleavstand 630 mm og ballastskulder 400 mm, vil sidemotstanden i et konsolidert spor variere mellom ca. 10 N/mm og 16 N/mm (tyske målinger) avhengig av svilletypen.

Som nevnt tidligere er sidemotstanden sterkt avhengig av ballastens konsolideringsgrad. I tillegg influerer løftebølgen under passerende materiell sterkt. Disse to faktorene kan det tas hensyn til gjennom korreksjonsfaktorer som vist i formelen. Passende korreksjonsfaktorer kan være 0,7 for begge.

5.3 Kritisk knekktemperatur

Den kritiske knekktemperaturen (dvs. den skinnnetemperaturen hvor en må regne med utkneking) kan beregnes for de forskjellige sporkonstruksjonene ut fra formelverket i forrige avsnitt.

Resultatet fra en slik beregning for noen av JBVs sporkonstruksjoner er vist i figuren under (for nypakket spor):



Kritiske knekktemperaturer for sporkonstruksjoner ved JBV avhengig av kurveradius basert på nøytraltemperatur 15°C. Dette var tidligere laveste tillatte. Siden er grensen hevet til 18°C.

Av figuren ser en at sikkerhetsmarginene ved de minste kurveradiene er meget liten for flere av de konstruksjonene som er i bruk hos oss, spesielt når det gjelder spor på tresviller.

En sikkerhetsfaktor mellom beregnet knekktemperatur og den faktisk forekommende skinnnetemperaturen er helt nødvendig. Denne marginen skal fange opp virkningen av bremsing, vibrasjoner, lokale spenningsvariasjoner, sporveksler og eventuelt andre faktorer. Manglende varig utfesting av sporet må også tas i betraktning, siden det alene kan utgjøre 10–15°C.

Det anbefales å innføre kjøring med redusert hastighet hvis skinnnetemperaturen er mindre enn 10°C under den beregnede knekktemperaturen. Helst bør man operere med en sikkerhetsmargin på ca. 30°C. Ved JBV angir forskriftene at hastigheten skal nedsettes i njustert spor, nettopp pga. liten sikkerhetsfaktor.

I tabellen på under er det vist kritiske knekktemperaturer for spor med S49 skinner, tresviller og betongsviller for konsolidert spor, nypakket spor og etter ballastrensing.

Nøytraltemp. 19°C	R=250 m	R=500 m
<i>Tresviller</i>		
Konsolidert spor	70	89
Etter pakking	53	68
Etter ballastrens	38	49
<i>Betongsviller</i>		
Konsolidert spor	97	120
Etter pakking	72	91
Etter ballastrens	49	64

Som en ser av tabellen er marginene relativt små. Det er derfor meget viktig å ha god styring på nøytraltemperaturen og at det ikke settes igang arbeider som påvirker sporets stabilitet ved høye skinnetemperaturer.

6 Nøytralisering

Nøytralisering er et viktig begrep ved helseveising av spor og det henvises til forskriftene for helseveist spor for en nøyaktig beskrivelse av hvordan arbeidene skal gjøres.

6.1 Definisjoner

Definisjonen er som følger:

Nøytralisering vil si å gi skinnene den lengden som svarer til spenningsfrihet ved nøytraltemperatur.

Arbeidene kan gjøres når skinnetemperaturen er i eller lavere enn nøytraltemperaturområdet.

Nøytralisering skal alltid gjøres når skinnene er lagt ved temperaturer utenfor nøytraltemperaturområdet og når skinnene er lagt i nøytraltemperaturområdet, men har ligget mer enn én uke før sluttveising gjøres. De eneste gangene nøytralisering kan sløyfes er når skinnene er lagt i nøytraltemperaturområdet og blir sveiset umiddelbart eller hvis de er lagt innenfor nøytraltemperaturområdet og sluttveises innen én uke og er merket ved leggingen slik at evt. endringer kan kontrolleres.

6.2 Framgangsmåte

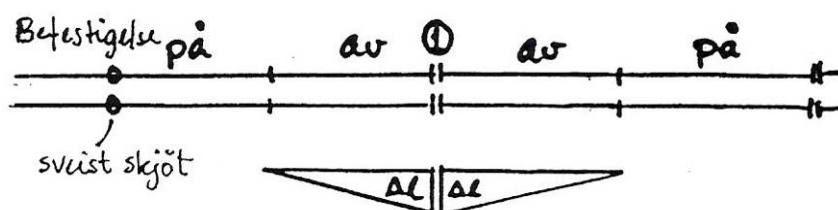
1) Skinnetemperatur i nøytraltemperaturområdet.

- Skinnebefestigelsen løsnes.
- Skinnene legges på ruller eller løftes med spett samtidig som de slås med tre- eller plastklubberfor å utløse spenninger i skinnen.
- Befestigelse påsettes i arbeidsretning fra skjöt som skal sveises og skjøten sveises.

2) Skinnetemperatur under nøytraltemperaturområdet

Medfører at skinnene må forlenges til nøytrallengde, dvs. til riktig lengde ved temperatur innenfor nøytraltemperaturområdet. Dette skjer med bruk av strekkapparat. Skinnene må forankres og en arbeider derfor på to mellomsveste skinner hvor halve skinnen er forankret og strekker de to endene mot hverandre. Avhengig av kurveradier og tilgjengelig tid, kan skinnene som strekkes mot hverandre ha lengder på opp mot 500 m eller mer hver.

- Skinnetemperatur avleses og forlengelse beregnes.
- Befestigelsen løses og skinnen gjøres spenningsfri ved aktuell temperatur.
- Forlengelse avmerkes i enden og minst på midten av skinnene som skal strekkes.
- Skinnene strekkes mot hverandre i det en sørger for en jevn forlengelse over hele lengden ved å observere målepunktene inntil total forlengelse er nådd.
- Befestigelsen påsettes og skjøten sveises.



Prinsippkisse ved bruk av strekkapparat for forlengelse.

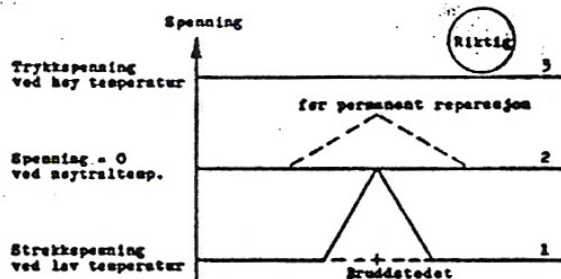
6.3 Reparasjon av skinnebrudd

En må spesielt merke seg nødvendigheten av nøytralisering ved reparasjon av skinnebrudd som er midlertidig reparert vinterstid. Om det ikke gjøres vil skinnebruddene kunne representere en stor fare for solslyng sommerstid pga. de spenningstoppene som oppstår.

Skinnebrudd i helsveist spor ved lav temperatur -
Spenningsforhold ved bruddstedet etter bruddet og
etter utbedringen.

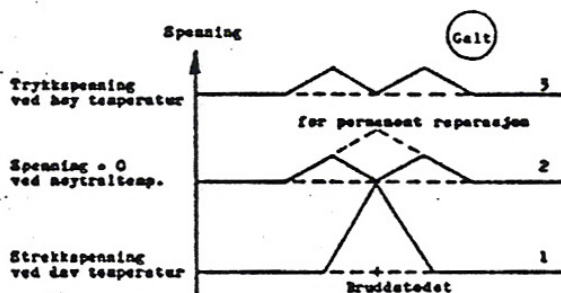
RIKTIG

Når bruddet utbedres ved nøytraltemperatur og bruddpartiet nøytraliseres vil man få tilbake normal tilstand i sporet ved bruddstedet idet spenningen = 0 ved nøytraltemperatur (linje 2)



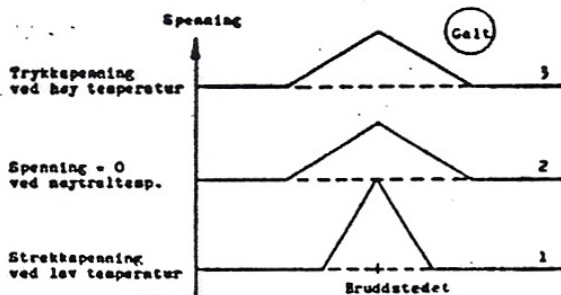
GALT

Hvis bruddet utbedres ved nøytraltemperatur uten å nøytraliserer bruddpartiet, vil man kunne få trykkspenningstopper i bruddets pustesoner ved nøytraltemperatur (linje 2) og spenningstopper ved den høye temperaturen (linje 3). Disse trykkspenningstoppene medfører økt selslyngfare.



GALT

Ved brudd i helsveist spor ved lav temperatur faller strekkspenningene i bruddstedet til 0 (linje 1). Ved innsveising av skinneskapp ved den lave temperaturen uten å nøytraliserer bruddpartiet, vil skinnen ved bruddstedet få trykkspenning når temperaturen stiger til nøytraltemperatur (linje 2) og det blir en trykkspenningstopp når temperaturen stiger videre til den høye temperaturen (linje 3). Denne trykkspenningstoppen medfører sterkt øket selslyngfare.



Skinnebrudd oppstått ved lav temperatur. Riktige og gale reparasjonsmetoder

7 Bygging og vedlikehold av helsveist spor

Det er en rekke enkle forholdsregler man kan ta for opprettholde eller bedre sikkerheten i et helsveist spor.

7.1 Generelle råd

Følger en rådene nedenfor vil en kunne komme langt mhp. å forbedre sikkerheten mot solslyng:

- 1) **Riktig rekkefølge i arbeidene.** Sluttveising og nøytralisering skal være det siste man gjør – etter at sporet er justert.
- 2) **Hvis varig utfesting av linjen mangler** skal aldri ballastrensing eller svillebytte gjøres uten etterfølgende nøytralisering. VUL må etableres samtidig.
- 3) **Sporet skal alltid nøytraliseres** ved sluttveising med mindre langskinnene er lagt få dager før ved nøytraltemperatur og kontrollmerker er innslått i skinnene.
- 4) **Kontroller at alle krav** er (eller kan bli) oppfylt før beslutning om helsveising tas, dvs.:
 - * Tilstrekkelig ballast/planering
 - * $R \geq 300$ m for tresvillespor
 - * $R \geq 250$ m for betongsvillespor
 - * Ballast av god kvalitet
 - * Skinnefeste i orden inkludert isolasjonsdeler

Er ikke ovenstående som det skal, ta skritt for at det blir det før sveising starter. Ta aldri sjanser med sikkerheten her.

- 5) **Ved helsveising i skarpe kurver** gi instruksjon om at nøytraltemperaturen skal legges høyt (gjerne på 24°C).
- 6) **Følg opp** at reparasjon av skinnebrudd gjøres riktig.
- 7) **Varig utfesting må gjøres** senest når sporet skal sveises. Dette er et absolutt krav i regelverket.
- 8) **Vurder mulighetene for å senke sporet** på smale fyllinger, eller sørg for fyllingsutvidelse slik at tilstrekkelig ballastprofil oppnås.
- 9) **Nøytraliser det helsveiste sporet** ved mistanke om at nøytraltemperaturen er feilaktig, f.eks. ved solslyngproblemer.
- 10) **Ingen sporjustering i skarpe kurver** ved for høye eller for lave temperaturer.

11) **Tenk på tilleggskreftene** som oppstår i sporveksler, ved større betongbruer og der tog bremser. Befestning og ballastprofil *må* være i orden på slike steder.

Hovedsaken for å sikre et sikkert helsveist spor er alltid å ha kontroll over nøytraltemperaturen og ikke ta sjanser når det gjelder nøyaktig utførelse av arbeidene med bygging og vedlikehold.

7.2 Problemkurver

Det er en rekke relativt enkle tiltak som kan gjøres for å bedre sikkerheten i kurver hvor man har problemer med solslyng. Man kan:

- nøytralisere og gjøre varig utfesting og evt. sørge for en lokal heving av nøytraltemperaturen i skarpe kurver.
- sørge for jevn og stor sidemotstand ved en rikelig ballastkant og rikelig med ballast mellom svillene.
- fortette svilleavstanden og/eller bytte til betongsviller.

Man må ikke bare sitte og vente på neste solslyng, men gjøre varlige tiltak for å sørge for at ikke solslyngene i problemkurver kommer igjen år etter år.

7.3 Hvis solslyng oppstår

Hvis solslyng oppstår skal man ikke ty til den enkle løsningen å bakse sporet ut, men *kappe sporet* slik at skinnene får anledning til å utvide seg. Full nøytralisering av kurven skal så komme i neste omgang når temperaturen blir lav nok til at arbeidene kan utføres.

Å bakse sporet i en hel kurve utover for å senke nøytraltemperaturen er i utgangspunktet uheldig i og med at man da nedsetter ballastmotstanden i hele kurven og dermed vil øke faren for ny solslyng i neste omgang. Dersom solslyng oppstår, må man hurtigst mulig sørge for å kalle ut kvalifisert personale som kan kappe sporet. Det er derfor særdeles viktig at det er god kommunikasjon mellom maskinmannskapene som gjør den provisoriske utbedringen og forvaltning som har ansvaret for en permanent løsning på problemet.