

Sporjustering

Kjell Enoksen, Alf Helge Løren og John Våge

JERNBANEVERKET
BIBLIOTEKET



101880



== INSTITUTT FOR VEG- OG JERNBANEBYGGING ==

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

NTNU

Notat utarbeidet mars 1997

Notat nr 1038

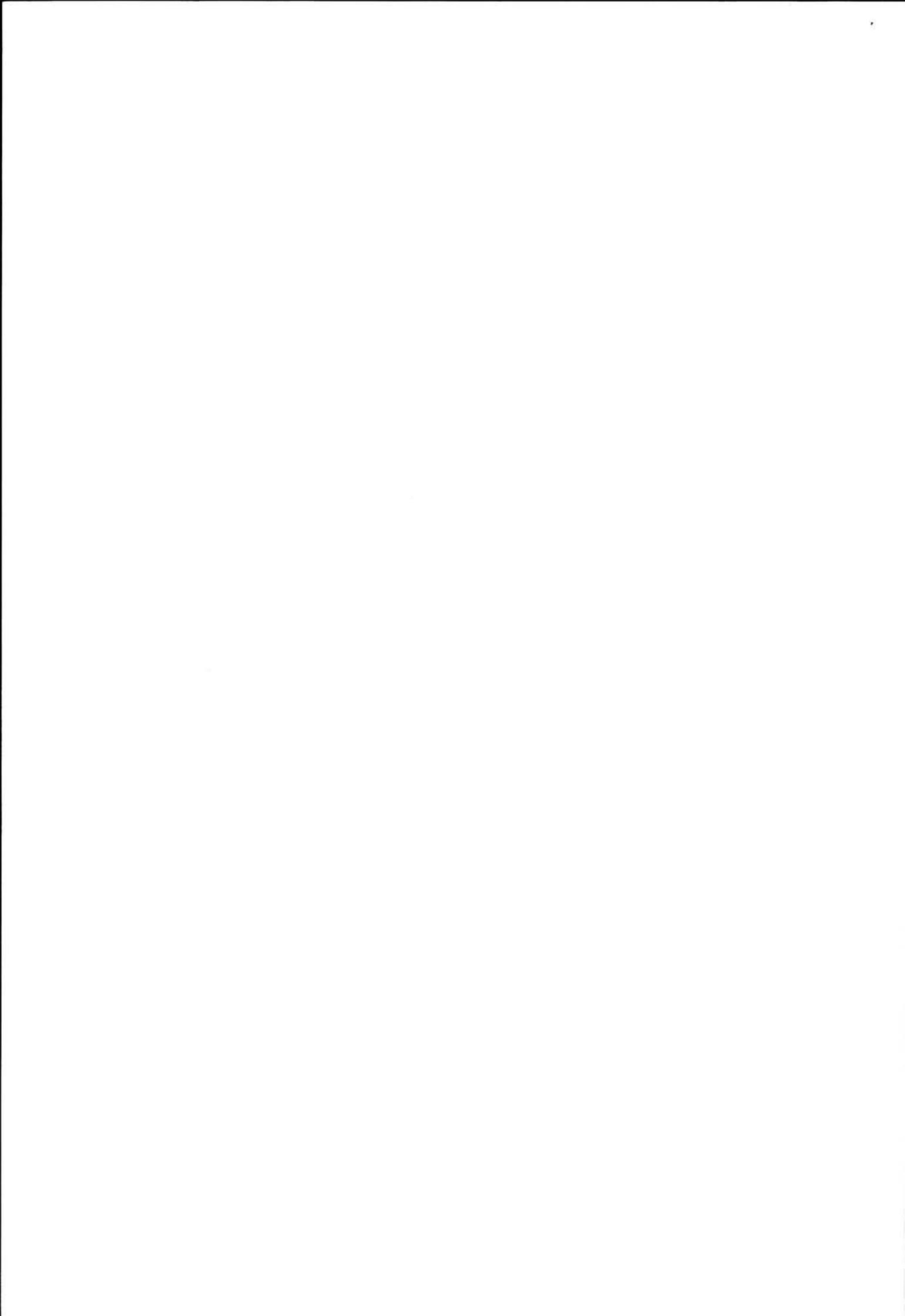
Jernbaneverket
Biblioteket

Ex. 1

q 625,173,2 NSB Eno

Innholdsfortegnelse

1. Innledning	1
2. Registrering av sporets tilstand	2
2.1 Generelt	2
2.2 Måleteknikk	3
2.3 Samvirke mellom spor og rullende materiell.....	5
2.4 Målesystem Mauzin.....	7
2.4.1 Generelt.....	7
2.4.2 Mauzin-diagrammet.....	10
2.5 Nytt målesystem	13
3. Sporgeometrijustering	16
3.1 Sporjusteringsmaskiner.....	16
3.1.1 Høydejustering.....	17
3.1.2 Sidejustering	18
3.2 3-punktsmetoden.....	20
3.3 4-punktsmetoden.....	24
3.4 Justering utfra beregnede punkter.....	25
3.5 Sporgeometri bestemt utfra vedlikeholdshensyn.....	26
4. Litteratur	28



1. Innledning

Et jernbanespor er en konstruksjon som må være i stand til å tåle store statiske og dynamiske belastninger. Det er allikevel grenser for hvilke påkjenninger sporet kan utsettes for uten at overbygningsdeler og sporgeometri brytes ned. For å hindre denne nedbrytningen, kreves det blant annet at sporet må være justert med tilstrekkelig nøyaktighet etter regler for horisontal- og vertikalkurvaturen.

Det er en nær sammenheng mellom sporets akse og begge skinnene i forhold til hverandre. Sporets akse beskriver en romkurve bestående av rettlinjer, kubiske parabler og sirkler i horisontalplanet, og rettlinjer og sirkler i vertikalplanet. Begge skinnestrengene følger sporets akse på avstander som varierer med sporets kurvatur. Sporgeometrien består derfor av trasèringselementene rettlinjer, overgangskurver og sirkelkurver, og krav til maksimale avvik fra disse stilles både i høyde- og sideretning.

Sporgeometrien må også sees i sammenheng med det rullende materiellets utforming som virker inn både på belastningene i sporet og passasjerkomforten. Denne sammenheng er avgjørende for justeringstoleransene som er bestemt for sporets geometri. Avvik fra den optimale sporgeometrien vil alltid forekomme, men kravene til nøyaktighet for justeringsstandarden øker i takt med kjørehastigheten. Formålet med justeringen av sporet blir å opprettholde en gitt beliggenhet og tilstand for sporet ved å utbedre feil i høyde- og sideretning.

Uavhengig av satsingsnivå på jernbaneutbygging, vil allerede eksisterende baner være dominerende i overskuelig fremtid. Horisontalkurvaturen med mange krappe kurver er i dag som regel den begrensende faktoren for kjørehastigheten, men i visse tilfeller kan også justeringsstandarden være avgjørende for maksimal tillatt hastighet.

I dette notatet vil først registrering av sporets tilstand bli tatt opp og deretter mer om selve sporgeometrijusteringen.



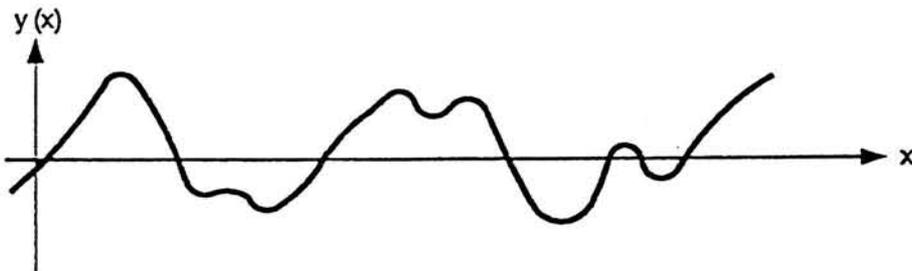
2.2 Måleteknikk

Kvantitativ forståelse av sporgeometrien oppnås først når den kan måles, og resultatene kan relateres til en entydig fastlagt basis. Denne basisen kan da enten være i form av et trianguleringsnett eller målevognens relative bevegelige basiser. Det er også hensiktsmessig å utvikle et begrepsapparat for å behandle sporgeometrien på en kvantitativ måte.

Begrepsapparatet må beskrive størrelsene som måles og hvordan de måles, på en entydig måte.

I dette kompendiet vil man ikke komme detaljert inn på ulike presentasjonsformer for sporgeometri, men bare kort nevne enkelte sider ved dem.

Vanligvis tegnes måleresultatene ut som grafer i et diagram. Lengdemålestokk er som regel 1 : 5.000, og høydeskala det vil si feilstørrelsen eller målstørrelsen er 1 : 1. Signalene som er bygget opp av harmoniske komponenter (frekvens), danner grafiske kurver med forskjellige utslag fra en nulllinje (figur 2.1). I denne forbindelsen kan Fourierrekkeutvikling brukes for å presentere spektraltettheten det vil si hvordan signaltettheten er fordelt på frekvens.



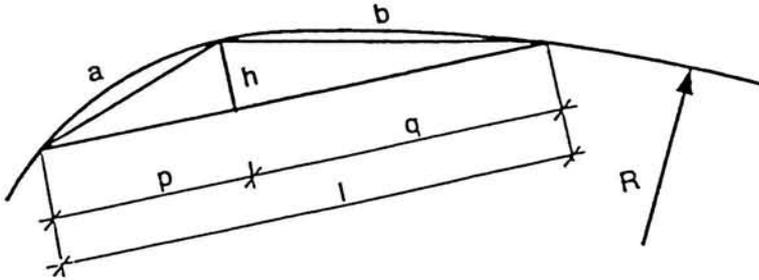
Figur 2.1 Grafisk kurve

Hvis det er snakk om prosessens sannsynlighetstetthetsfordeling, er det et uttrykk for hvor stor brøkdel av en målestrekning som prosessen befinner seg innenfor et visst nivå (figur 2.2). For å illustrere dette, kan man f.eks. si at på 5 % av en kontrollert strekning, ligger sporvidden på mellom 1455 mm og 1465 mm.

Sannsynlighetstetthetsfunksjonen $p(y)$ forbindes med den delen av den totale avstanden L hvor $y(x)$ ligger mellom y og $y + \Delta y$. Et estimat av sannsynlighetstetthetsfunksjonen $p(y)$ fås slik:

$$h = \frac{ab}{2R}$$

Hvis $p + q = l < R/5$ settes: $a = p$ og $b = q \Rightarrow h = pq / 2R$ (figur 2.3).



Figur 2.3 Parabel- eller pilhøydemetoden

2.3 Samvirke mellom spor og rullende materiell

Rullende materiell stiller krav til sporet både statisk og dynamisk i tillegg til at visse geometriske randkrav må være oppfylt. De geometriske randkravene går på den geometriske utformingen av jernbanehjul og jernbaneskinner og dermed samspillet mellom dem. De statiske randkravene går derimot på grensebetingelser for av-/pålasting av hjulkreftene. Disse påvirkes sterkt av ulike faktorer i sporet og det rullende materiellets utforming som f.eks. vindskjevhet, fjærstivhet og lignende.

Når det gjelder dynamiske randkrav, er det først og fremst bølgelengder i sporet som eksiterer det rullende materiellets egenfrekvenser, man tenker på. Bølgelengdene fås av uttrykket:

$$L = \frac{v}{f} \Rightarrow v = fL$$

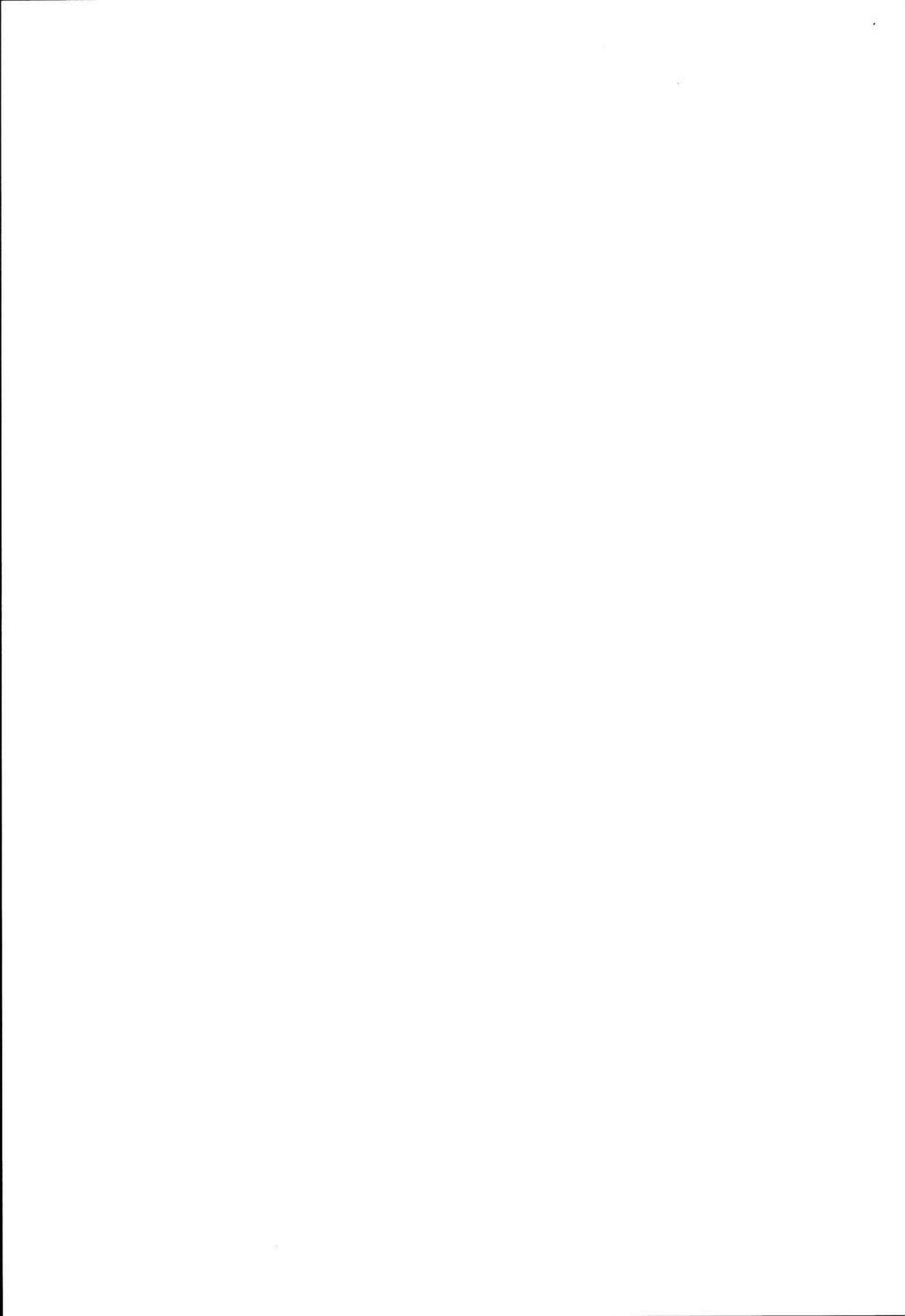
hvor $L =$ bølgelengde (m)

$v =$ kjørehastighet (m/s)

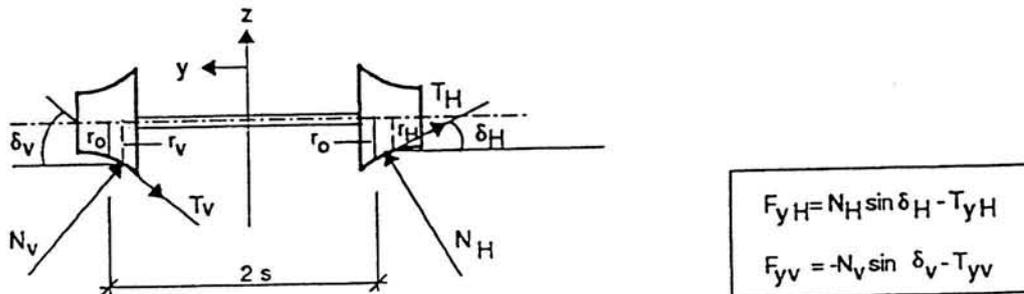
$f =$ egenfrekvens i Hz (s^{-1})

Egenfrekvens for sporkomponenter og rullende materiell ligger i området 1 - 2.000 Hz.

Aktuelle kjørehastigheter spenner fra 35 km/h til 300 km/h tilsvarende fra 10 m/s til ca. 85



Alle krav til det tekniske systemet hjul/skinne bestemmes utfra hjulsatsens bevegelse over skinnene. Den laterale eller sideveis bevegelsen av hjulakselen styres hovedsakelig av sporets geometri i sideretningen. De laterale kreftene mellom spor og hjulsats overføres ved friksjon, og det fører til et energitap mellom hjul og skinne. Den geometriske formen av kontaktpunktet mellom dem blir derfor avgjørende for sammenhengen mellom sporets geometri og hjulsatsens respons. Hovedkreftene som virker på en hjulsats er vist i figur 2.6.



Figur 2.6 Hovedkrefter på en hjulsats

2.4 Målesystem Mauzin

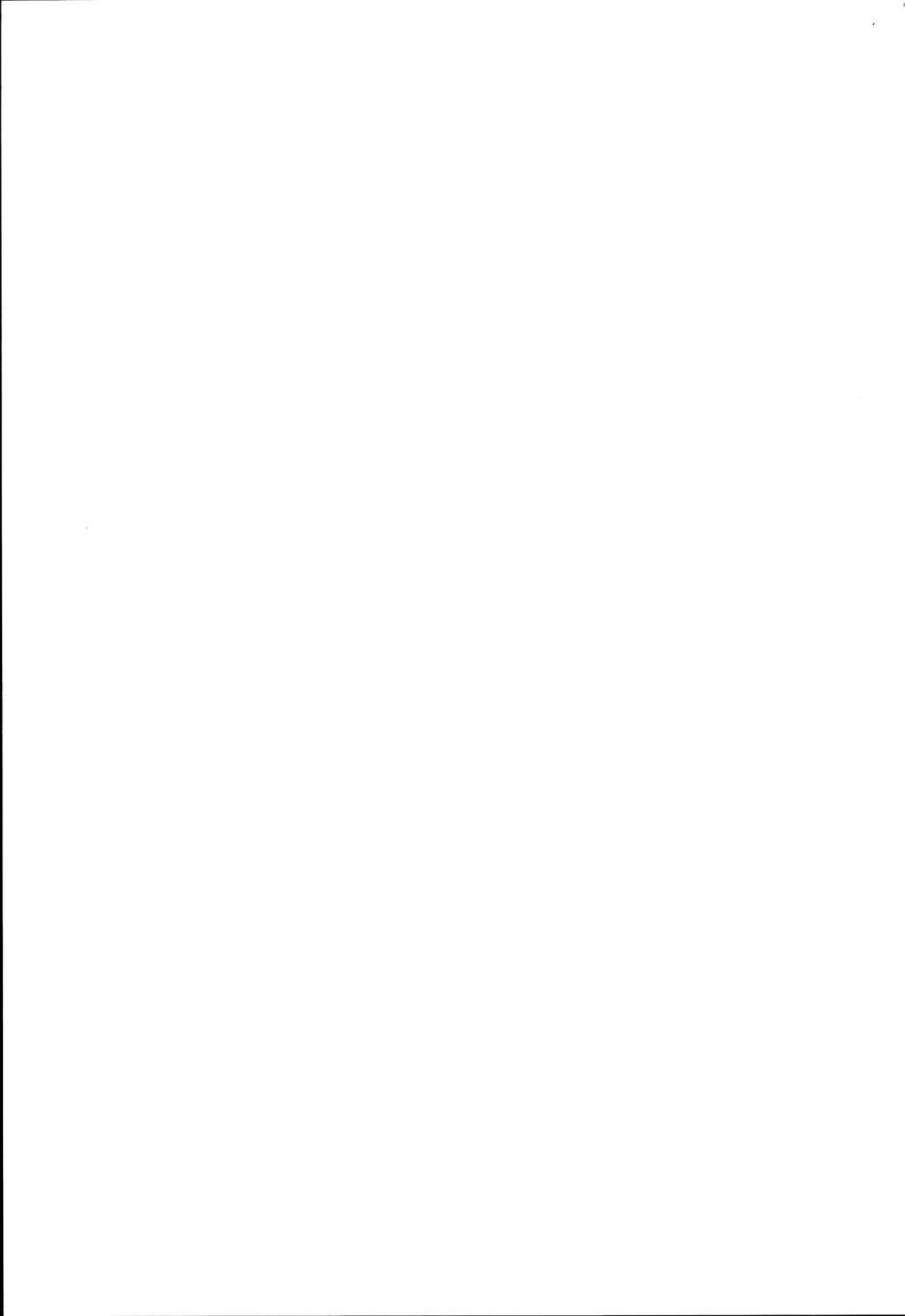
2.4.1 Generelt

I Norge og Sverige benyttes hovedsakelig en vogn med det franske systemet Mauzin til måling av sporgeometrien.



Figur 2.7 Den svenske målevognen type Mauzin som leies inn av Jernbaneverket

Mauzin-vognens totalvekt er 49 tonn. Den har en to-akslet boggi i hver ende og en fire-akslet måleboggi på midten som gir en aksellast på 6,1 tonn. Vognen dekker et bølgeområde fra rundt 2 m til opp i mot 60 m.





Kvalitetsklasse	Hastighet (km/h)	Høydevegs											Sidevegs							
		Ujevnheter i høyden			Høyde- forskjell			Vindsjævehet ¹⁾					Påløydde			Sporvidde				
								2m		9m						Avvikelse ²⁾			Endring ³⁾	
		mm			mm			mm		mm			mm			mm				
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	B	C	A	B	C	A	B	C	B	C
K0	145 -	2	4	6	2	4	6	2	7	10	20	31	2	4	6	±2	-5, -5	-15, -5	7	10
K1	125 - 140	2	4	7	2	4	7	2	7	10	20	31	2	5	7	±2	-7, -5	-20, -5	8	12
K2	105 - 120	2	5	9	2	5	9	2	7	10	20	31	2	6	9	±2	-7, -5	-20, -5	9	15
K3	75 - 100	3	7	12	3	7	12	3	7	10	20	31	3	8	12	±3	-15, -5	-30, -5	10	18
K4	40 - 70	4	10	16	4	10	16	4	7	10	20	31	4	12	16	±4	-15, -5	-30, -5	12	21
K5	- 40	5	12	20	5	12	20	5	7	10	20	31	5	16	20	±5	-15, -5	-30, -5	15	25
Linje i diagrammet		1 og 2			3			4					5 eller 6			7				
Målebasistengde (m)		13,42			10,92			2,75 ⁴⁾					10			—				

Tabell

Forklaring:

Kolonne A = For nyjustert spor
 Kolonne B = Vedlikeholdsgrense
 Kolonne C = Akuttgrense

Akselerasjonslinje: Vedlikeholdsgrense: utslaget ≥ 5 mm fra grunnlinja

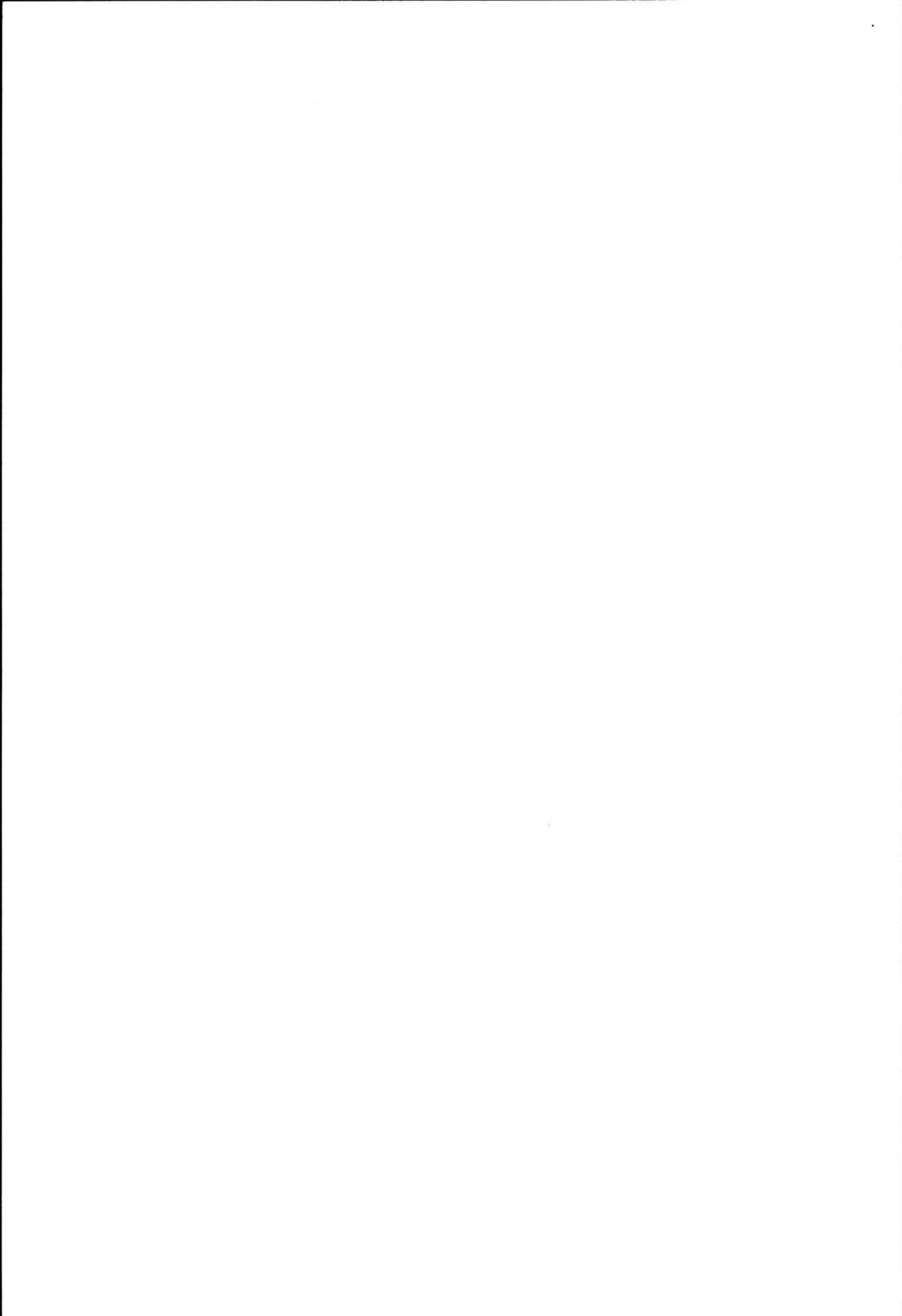
1) I overhøyderampe gjelder verdien i kolonne C både som avvikelse fra grunnverdien (det utslaget som skal finnes i overhøyderampa) og som avvikelse fra nullinja. Det er altså den totale vindskjevheten som det blir sett på.

2) Sporviddens avvikelse regnes fra grunnverdien som er 1435 mm.

3) Sporviddens endring begrenser sporviddevariasjonen. Endringen regnes over 10 m sporlengde.

4) Transformeres i målediagrammet til 2 m.

Figur 2.10 Jernbaneverket's justeringsnormer utfra Mauzindiagram



Vindskjevhet har stor betydning for vogngangen og avsporingsfaren.
(Lengdeskala 1 : 5.000, høydeskala 1 : 11/8)

Linje 5 og 6 Pilhøyde.

Her tegnes horisontalkurvaturen ut. Det brukes kontinuerlig korde på 10 m.
(Lengdeskala 1 : 5.000, høydeskala 1 : 1)

Linje 7 Sporvidde.

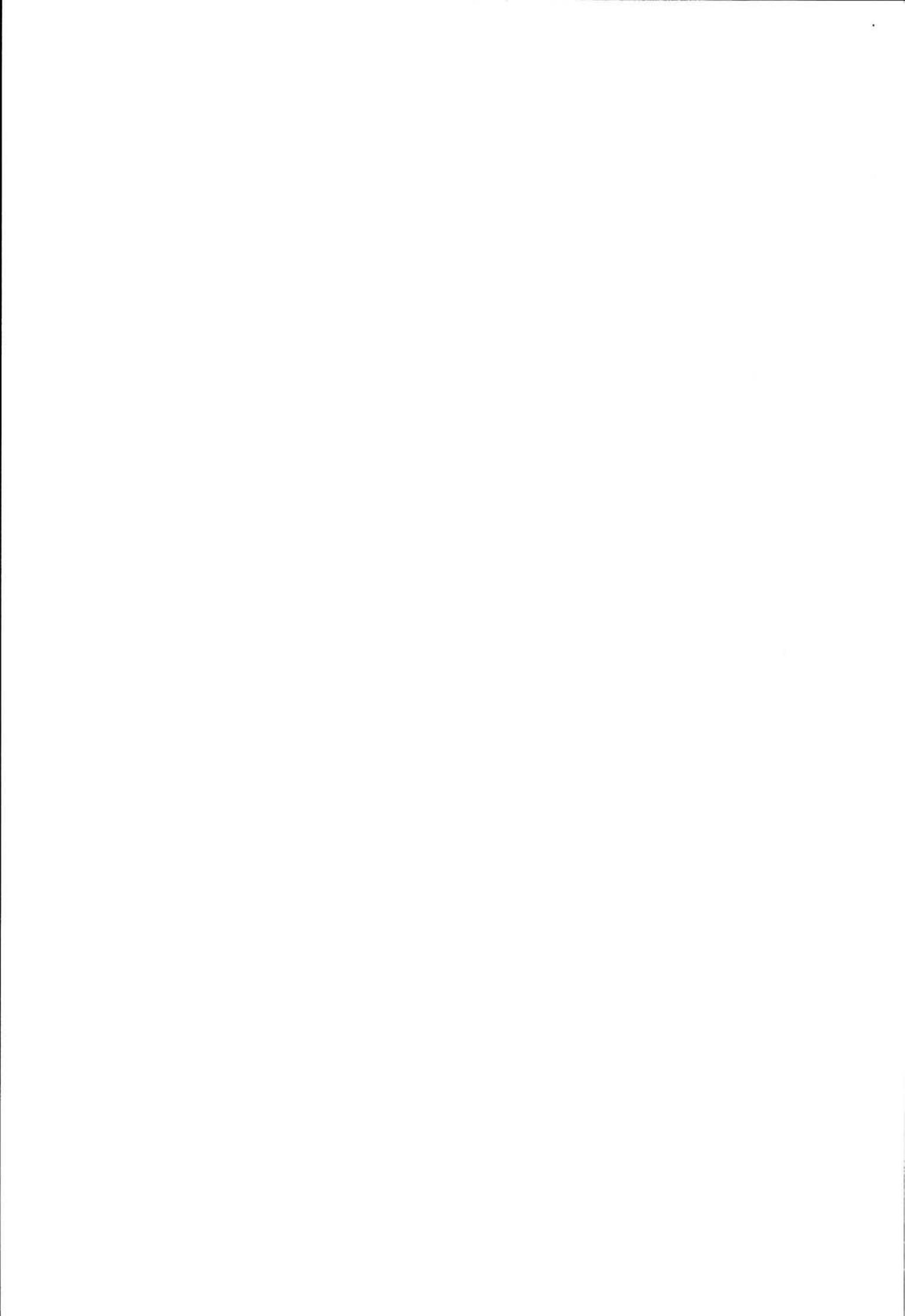
Sporvidden mellom skinnene måles 14 mm under sporplan (registrerer avviket fra 1435 mm, som er den teoretiske verdi). (Lengdeskala 1 : 5.000, høydeskala 1 : 1)

Linje 8 Langbølgede sidefeil.

Langbølgede sidefeil gir små utslag i pilhøydediagrammet, siden det der brukes en målebasislengde på 10 m. De defineres som periodiske sidefeil med bølgelengder fra 30 m og oppover. Linje 8 blir rekonstruert fra pilhøydelinjene 5 og 6. Lange sidefeil er viktige for komforten ved høye hastigheter. De er opphav til urolig og rykket toggang. Siderykket øker omtrent proporsjonalt med hastigheten i tredje potens.
(Lengdeskala 1 : 5.000, høydeskala 1 : 2)

Figur 2.12 viser hvordan resultatene kommer ut i Mauzin-vognen. For flere av diagrammene blir det tegnet en eller to streker for toleransekravene. Dette gjør at man lett ser når det finnes feil i sporet som er større enn toleransekravene. Diagrammene benyttes både til å plukke ut de alvorlige feilene som må rettes opp med en gang, og for å planlegge hva som bør gjøres ute i sporet på lengere sikt blant annet sporjustering.

Til hjelp for tolking av diagrammene er det utviklet et dataprogram. Det kommer derfor ut 4 forskjellige datalister i tillegg til selve Mauzin-diagrammet. De er tenkt som et supplement og brukes for å få en rask oversikt av sporstandarden og for direkte å kunne plukke ut de alvorlige feilene.

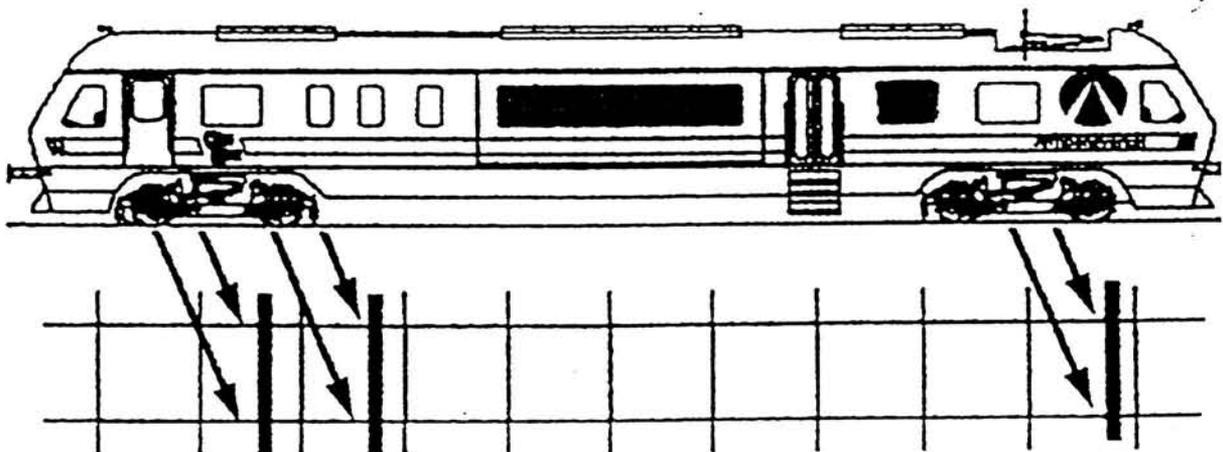


2.5 Nytt målesystem

Jernbaneverket vil i løpet av 1998 kjøpe inn en ny målevogn til måling av sporgeometrien, kontaktledningen og skinneoverflaten (rifler og små bølger). Den nye målevognen skal erstatte den svenske "Mauzin-vognen" som har begynt å trekke på årene og som er lite egnet til å kontrollere skinnegangen for høyhastighetstog, selv i norsk målestokk, det vil si 160 - 200 km/h.

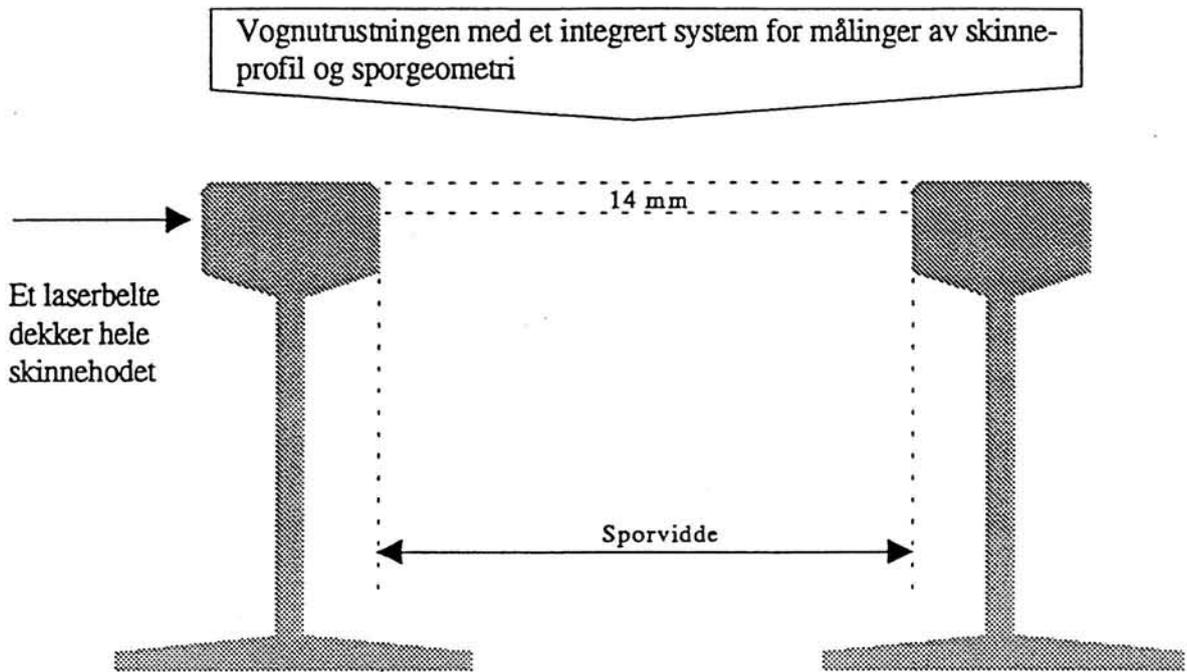
Det var blant annet konturene av ny jernbaneutbygging med helt andre hastigheter som gjorde det nødvendig å se kritisk på de former for måling som blir anvendt i Norge. Kravet til den nye målevognen er blant annet at den ved egen motorkraft skal kunne foreta målinger i 160 km/h, og fremført i tog skal den kunne foreta målinger i 200 km/h.

Målevognen er en ribbet fransk restaurantvogn i stål som blir helrenovert (figur 2.13). Den får nye FIAT-boggier og forsynes med dieselelektriske fremdriftsmotorer som skal yte tilstrekkelig til å befare det nasjonale jernbanenettet i 160 km/h der dette er aktuelt. Den vil bli utrustet med (automatisk togkontroll) ATC-basert posisjonssystem og skal dessuten tilrettelegges for å måle øvrige aspekter som balliser, teledekning, sporkrefter med mere i fremtiden. Vognen skal brukes til fire forskjellige typer målinger. Det er vanlige målinger, periodiske driftsmålinger, overtakelsesmålinger og eksperimentelle målinger.

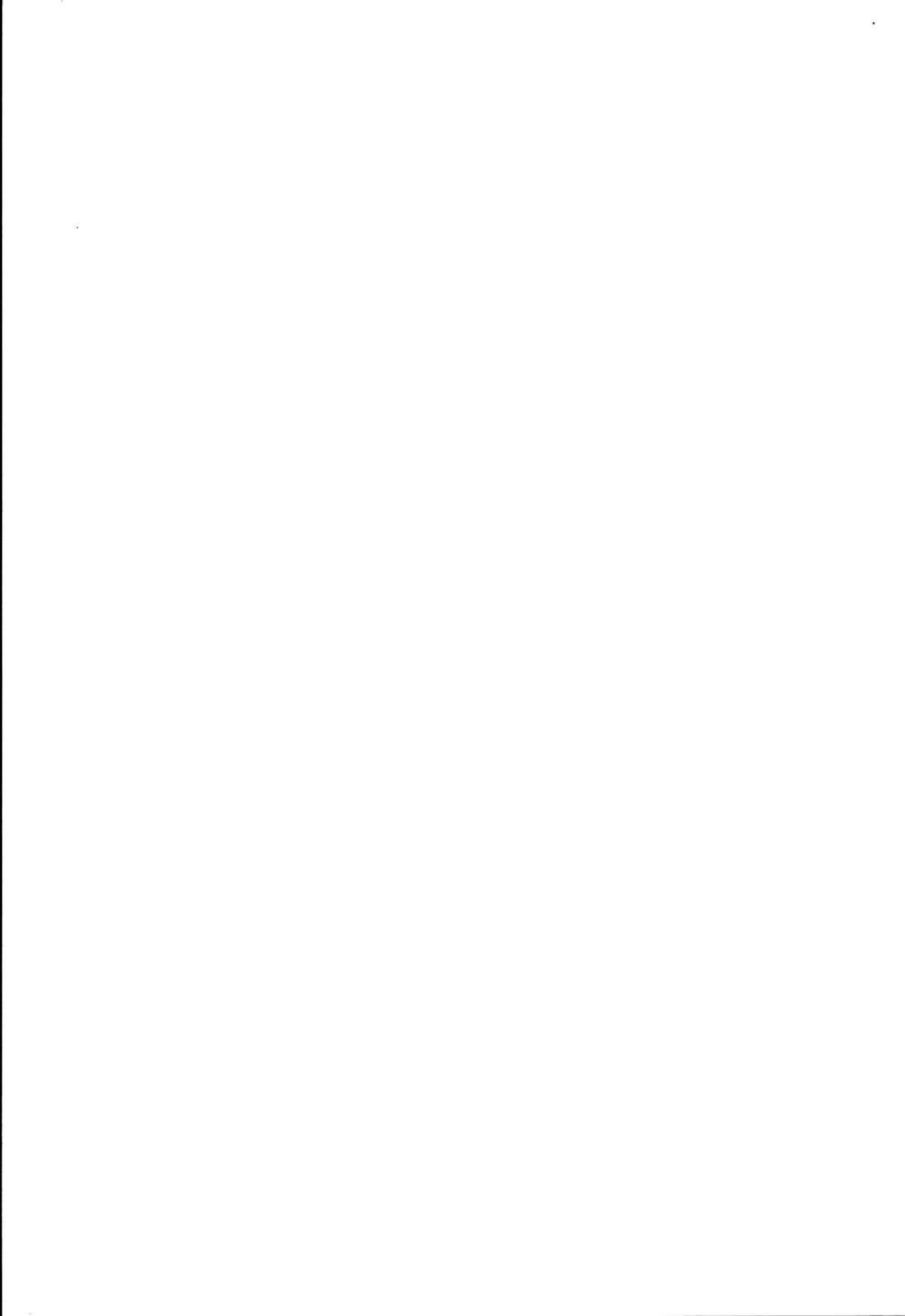


Figur 2.13 Den nye målevognen

Med vanlige målinger menes målinger ved driftsforstyrrelser på grunn av sporfeil (solslyng, telehiv med mer). I overtakelsesmålinger ligger kontroll av at ferdig anlegg har den foreskrevne standard før anlegget tas i mot av regionene.



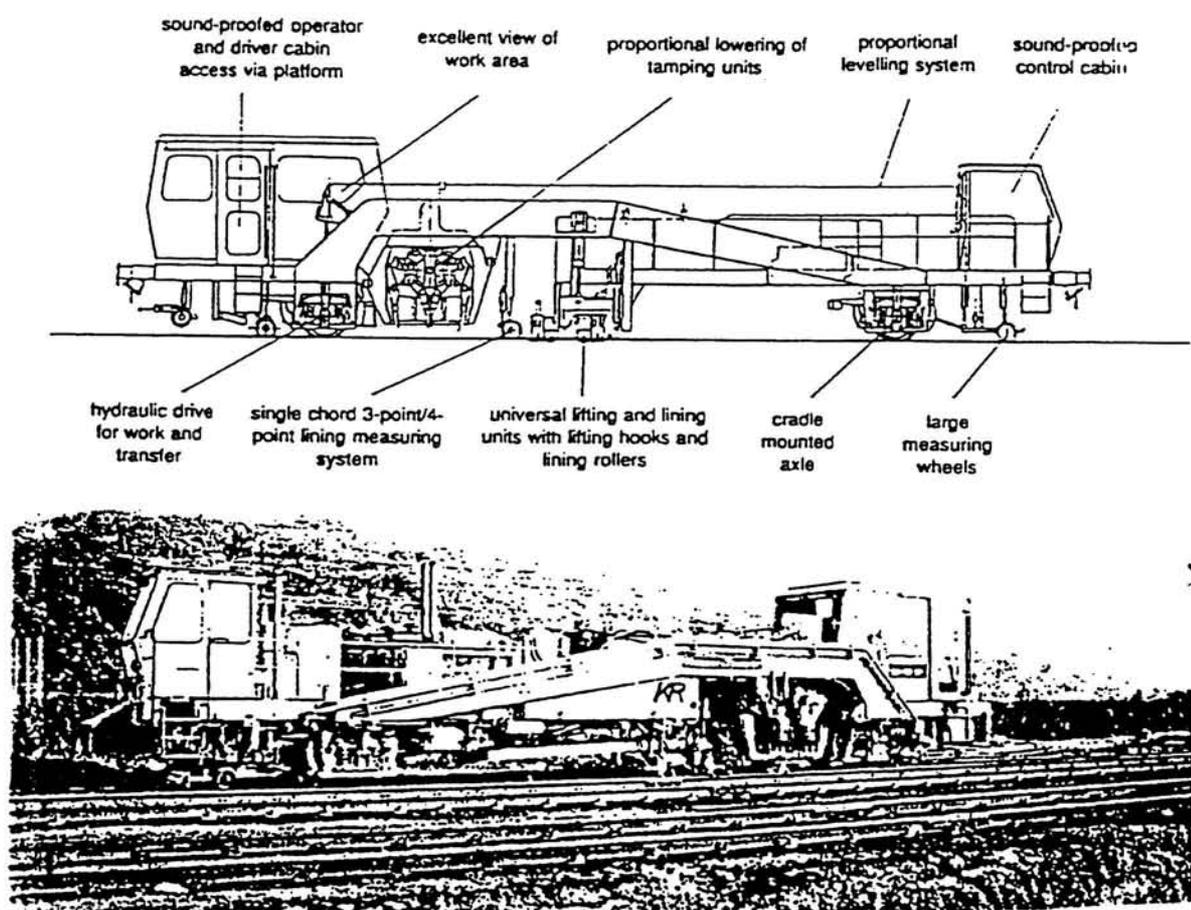
Figur 2.15 Målepunktet på skinnen



En sporjusteringsmaskin utfører altså følgende tre arbeidsoperasjoner:

- Nivellering (justering av sporets beliggenhet i høyden, høydejustering).
- Baksing (justering av sporets beliggenhet sidevegs).
- Pakking (etterfylling og komprimering av ballast under svillene).

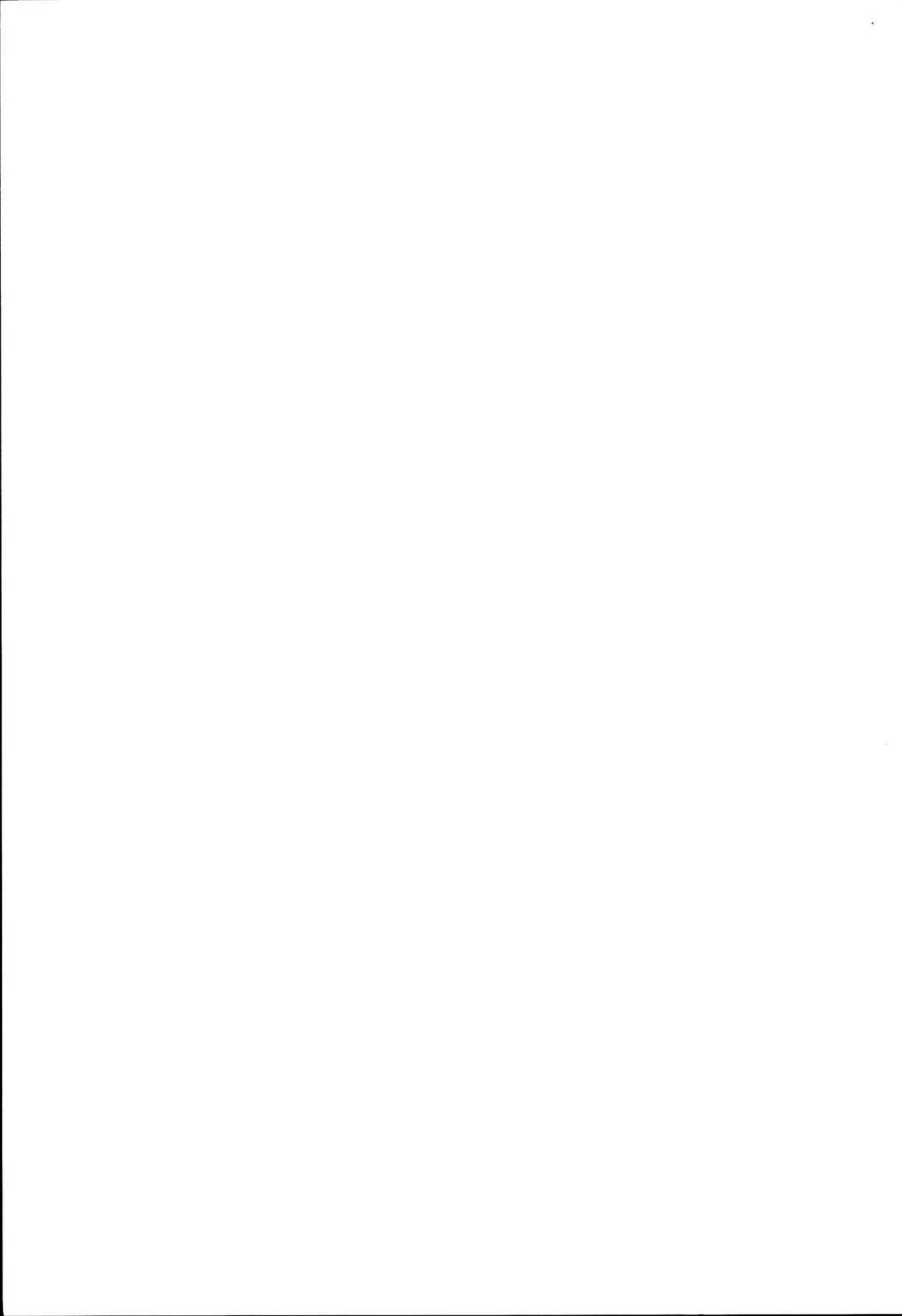
Høydejustering og baksing forutsetter at maskinen måler sporgeometrien. Nivellering skjer med 3-punktsmetoden, mens sidevegs justering kan gjøres enten med 3- eller 4-punktsmetoden. Disse metodene er beskrevet nærmere i henholdsvis punktene 4.2 og 4.3.



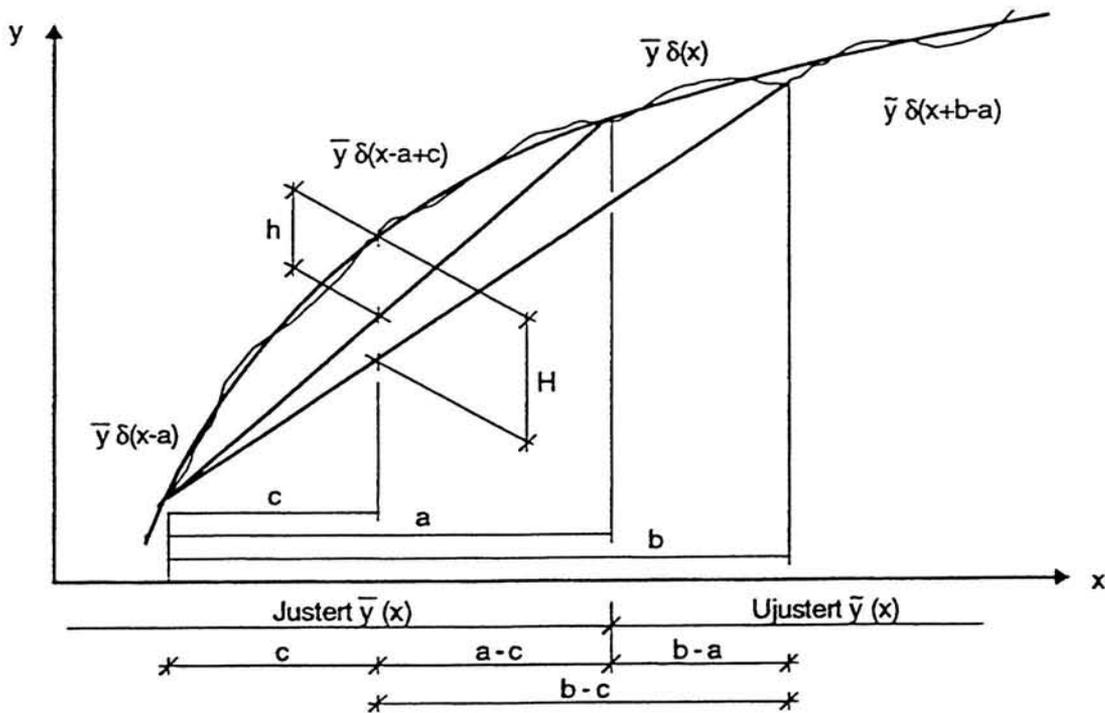
Figur 3.1 Eksempel på justeringsmaskin (Plasser Duomatic 08-16 SP)

3.1.1 Høydejustering

Høydejustering skal utjevne sporets variasjoner i høyderetningen med hensyn til den enkelte skinnens variasjoner i høyderetningen og skinnenes innbyrdes høydenivå. I praksis foretas sidejustering samtidig med høydejustering.



4-punktsmetoden, - nærmere beskrevet i 3.3, - er det andre målesystemet som kan brukes ved bakking av sporet. Dette er et firepunkts kordesystem. To målereferanser dannes av to korder med hver sine følere mot sporet. Fra disse to referansene måles det to forskjellige pilhøyder på to ulike steder med fast, målesystemavhengig avstand, det vil si at forholdet mellom de målte pilhøydene er konstant. Dette betyr med andre ord at det måles to pilhøyder i en kurve, men med forskjellig lengde på korden. Utfra målesystemet i sporjusteringsmaskinen vil det være et fast forhold mellom disse to pilhøydene. Hvis ikke dette forholdet oppfylles, er kurven ikke skikkelig justert, og sporet må bakeses til forholdet mellom pilhøydene stemmer overens med verdien i målesystemet. (figur 3.3.)



Figur 3.3 4-punkts kordesystem

Ved justering i en overgangskurve må det innføres en korreksjonsverdi på fremste føler for den lengste korden det vil si referansekorden for å oppnå riktig resultat.

Til slutt må nevnes at oppmerking av sporets traséringselementer er viktig for resultatet av sporjusteringen. Forskyves OB'er eller OE'er induseres sideforskyvninger som er gale i forhold til sporgeometrien på stedet.

SPR 131 och 141. L1 = 5.505 L2 = 8.23

ARBETSRIKTNING ->

10 m 


1. FÖRE BAX

1. EFTER BAX

2. FÖRE BAX

2. EFTER BAX

3. FÖRE BAX

3. EFTER BAX

Figur 3.5 Automatbaks med SPR 131

Det er vanlig å beskrive sporfeilene som en sum av ulike sinusfunksjoner (Fouriertransformasjon). Se figur 3.6. Man får da et forhold, H mellom amplituden før og etter baksing, som kun avhenger av bølgelengden til sinusfunksjonen.

SPR 131 och 141. L1 = 5.505 L2 = 8.23

ARBETSRIKTNING ->

18 m 


FÖRE BAX

18 m UÅGLÄNGD

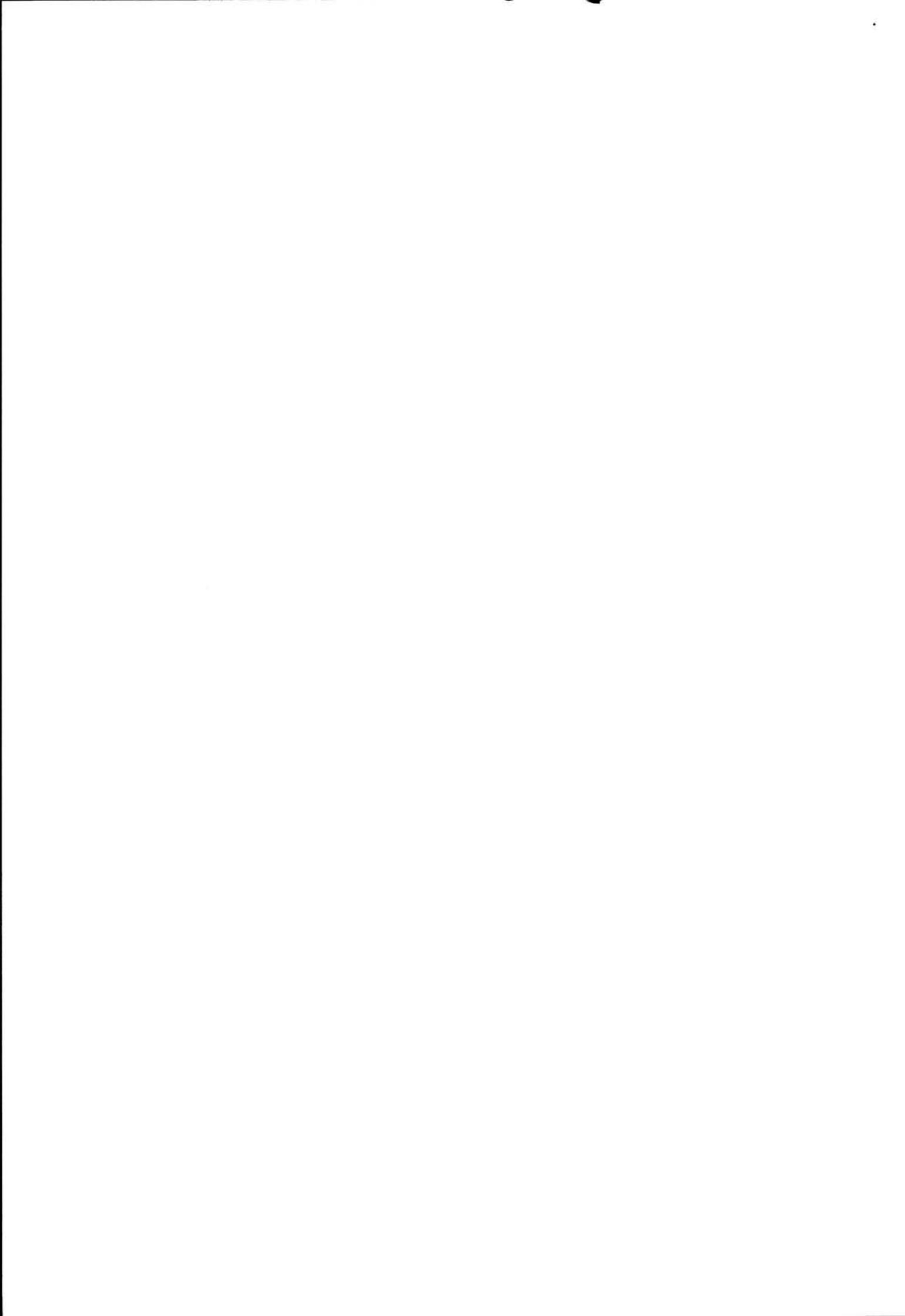
EFTER BAX

FÖRE BAX

5 m UÅGLÄNGD

EFTER BAX

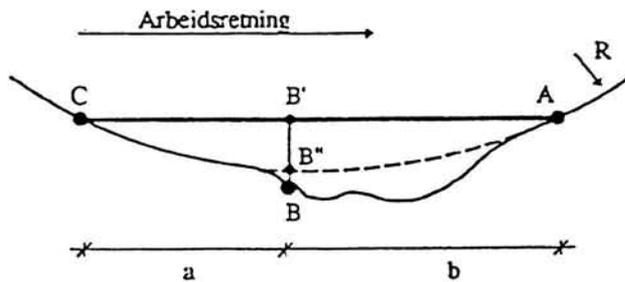
Figur 3.6 Automatbaks med SPR 131, sinusformede sporfeil



Ved baksing med 3-punktsmetoden i kurve må operatøren mate en pilhøyde p (avstanden mellom B' og B'' i figuren) i maskinen, som vist på figur 3.9. Det kan vises at pilhøyden er (utledningen bygger på Taylor-rekkeutvikling):

$$p = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^2}{2R} - \frac{b^2}{2R} = k \frac{1}{R}$$

Man får altså en maskinspesifikk konstant multiplisert med krumningen.



Figur 3.9 Baksing med 3-punktsmetoden i kurve

Om maskinen stilles inn for feilaktig radius, får man feil i sidejusteringen. Gir man inn for stor krumning, får man en reduksjon av radius i kurven (og motsatt), man risikerer altså at feilen bare øker etter justering. Dette forholdet er illustrert i figur 3.10.

FELAKTIG RADIEINSTÄLLNING PÅ SPR MED 3-PUNKTSMETOD. $L_1 = 5.585$ $L_2 = 8.23$
ARBETSRIKTNING →

10 m ←
c c c

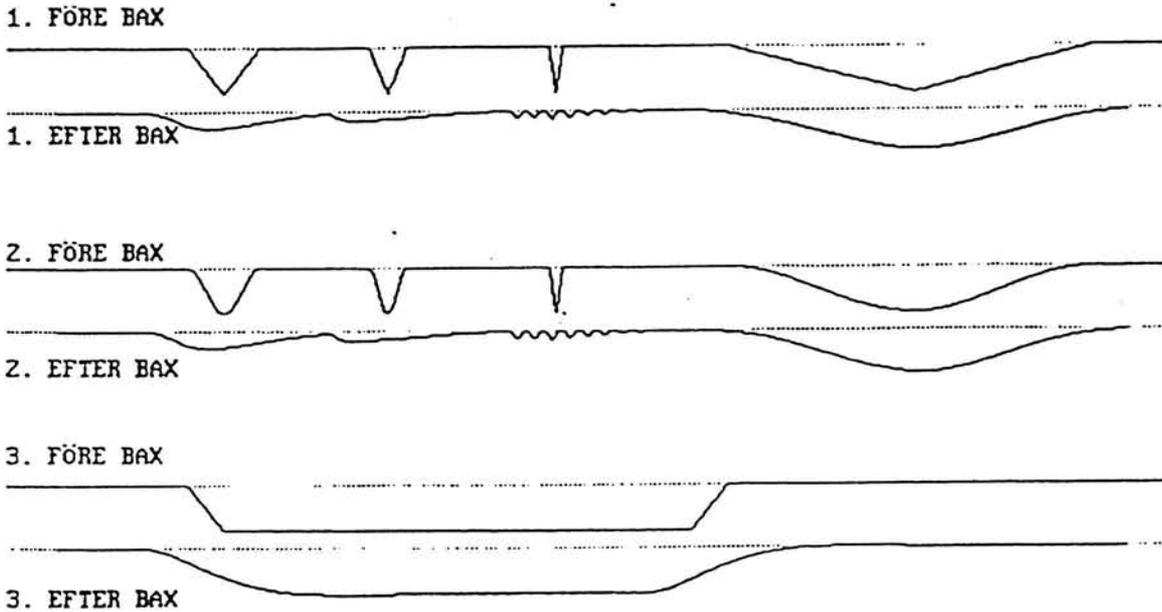
MAUZINMÄTNING FÖRE BAX

BAXFELETS STORLEK

MAUZINMÄTNING EFTER BAX

Figur 3.10 Baksefeil ved pilhøydefeil

SPR MAINLINER MD 07-32 (LONG BASE). L1 = 10 L2 = 14.785 L3 = 25.785
 ARBETSRIKTNING ->
 18 m

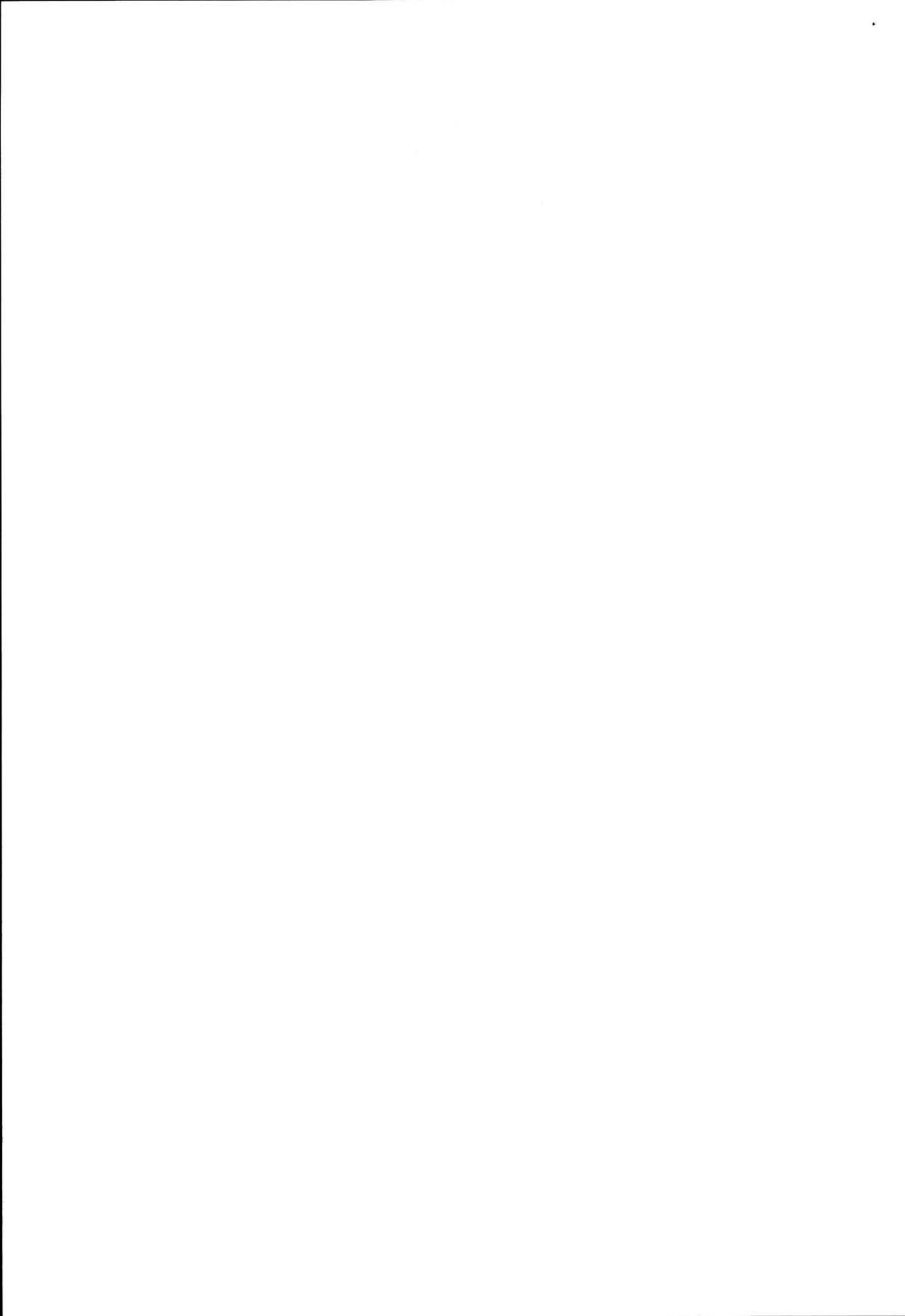
Figur 3.12 Automatbaks med MD 07-32

Overføringsfunksjonen H er som for 3-punktsmetoden svært avhengig av bølgelengden til feilene. Noen maskiner har overføringsfunksjon som for visse bølgelengder har en verdi større enn 1, det vil si at sporfeilen øker etter justering for disse bølgelengdene. Man bør derfor være forsiktig med å bruke gjentatt automatbaks med slike maskiner. Når bølgelengden går mot uendelig, går alltid verdien på H mot 1.

Ved 4-punktsmetoden behøves ingen innstilling av maskinen i selve sirkelkurven, i det den bakser sporet til den sirkel som beskrives av første, tredje og fjerde målepunkt. Ved tangeringspunkt og i overgangskurver behøves likevel korrigering, slik at operatøren også her trenger kjennskap til riktig sirkelradius, type og lengde for overgangskurver og beliggenhet av tangeringspunkter (begynnelsepunkt for sirkelkurve uten overgangskurve).

3.4 Justering utfra beregnede punkter

Som tidligere nevnt vis målebasisen, både ved 3- og 4-punktsmetoden, på grunn av at det fremre målepunktet går på ujustert spor. For å forbedre effekten beregner man ofte nødvendige justeringer på forhånd (f.eks. med teodolitt/totalstasjon). Man kan f.eks. beregne bakseverdi for hver 10 meter, og gi disse inn i maskinen. Man kunne tenke seg at



For at ikke flere enn ett tangeringspunkt samtidig skal havne i justeringsmaskinens målebasis, bør kortere linjeelement enn 20 m unngås. DB anbefaler minst 30 m, mens minstekravet i Jernbaneverket's regelverk er kun 10 m. Kortere overgangskurve enn 20 m bør unngås (ved s-kurver regnes her total lengde for de to overgangskurver dersom disse har samme klotoideparametre).

Ulempene ved korte linjeelement reduseres dersom justeringsmaskinene er utstyrt med datamaskin for beregning av pilhøyder etc., men slikt utstyr mangler i mange av Jernbaneverket's justeringsmaskiner.



Jernbaneverket
Biblioteket

JBV



09TU11576