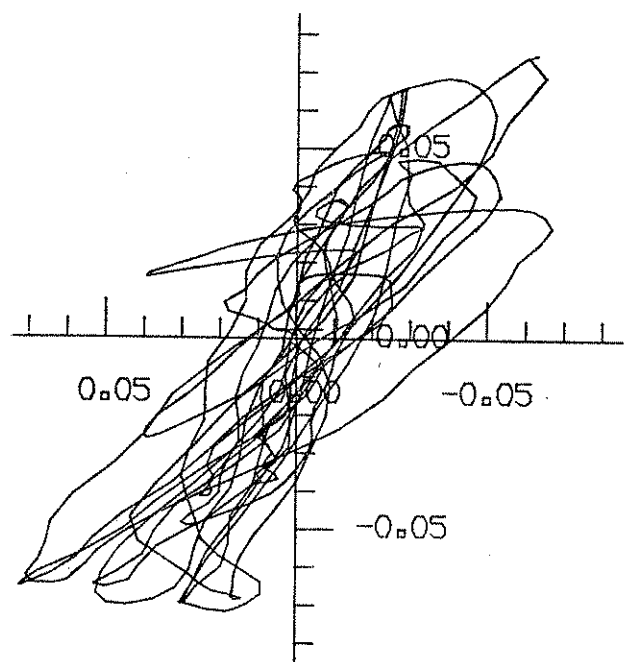
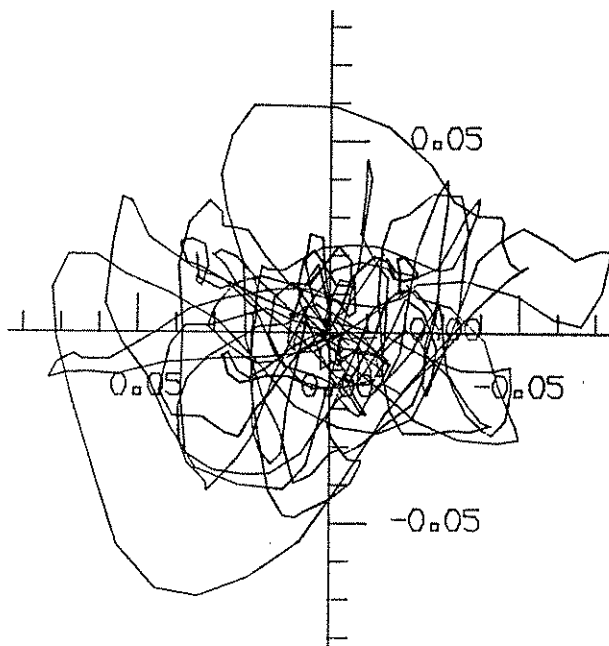


**SVERIGES  
LANTBRUKSUNIVERSITET**

## **Sprutbommens rörelser – en sprutteknisk felkälla**

**Sprayerboom movement – A spraytechnical source of error**

**Årad Bondesson**



---

**Institutionen för  
lantbruksteknik**

**Swedish University of Agricultural Sciences  
Department of Agricultural  
Engineering**

**Rapport 99  
Report**

**Uppsala 1985**

ISSN 0347-9773

ISBN 91-576-2426-7

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sid

1.	Förord	5
2.	Inledning	7
	2.1. Mål	7
	2.2. Historik och bakgrund	7
3.	Bomrörelsernas karaktär	9
4.	Faktorsamverkan	10
	4.1. Förhållanden påverkbara vid bommen	10
	4.2. Omgivande luft	16
	4.3. Avsättning och resultat	17
	4.4. Rörelseriktningens inverkan	20
5.	Sprutekipaget - ett mekaniskt system i rörelsetillstånd	26
	5.1. Orsakande faktorer	28
	5.1.1. Markojämnheter och körhastighet	28
	5.1.2. Förarens körsätt	31
	5.2. Samverkande faktorer	31
	5.2.1. Traktorns konstruktion	31
	5.2.2. Kopplingssystem traktor/spruta	32
	5.2.3. Sprutans konstruktion	32
	5.2.4. Bommens konstruktion	33
	5.2.5. Upphängningens konstruktion	39
	5.2.5.1. Passiv dämpning	40
	5.2.5.2. Aktiv dämpning	61
6.	Bomrörelsernas storlek	63
7.	Diskussion	65
	7.1. Resultat, egna synpunkter och slutsatser	65
	7.2. Förslag till provningsmetod	68
8.	Sammanfattning	70
9.	Summary	72
10.	Referenser	74
	Bilagor	

## 1. FÖRORD

Denna studie har utförts som examensarbete vid Institutionen för arbetsmetodik och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet.

Arbetet bygger på en litteraturstudie av förekommande och tillgänglig litteratur inom ämnesområdet "sprutbommens rörelser". Denna litteratur har huvudsakligen bestått av engelska, tyska och holländska försöksrapporter.

Impulsen till mitt ämnesval fick jag vid ett studiebesök hos National Institute of Agricultural Engineering (NIAE), under en årskursresa till Storbritannien, sommaren 1982.

Det är min förhoppning att arbetet skall stimulera utvecklingen av lantbruks-sprutor i riktning mot de precisionsmaskiner de rimligen måste vara, med hänsyn till miljö och ekonomi. Denna utveckling bör även stimuleras genom att man i framtida officiella provningar av lantbrukssprutor innefattar ett moment för mätning och värdering av sprutbommens rörelser.

Ett varmt tack riktas till min handledare professor Kjell Svensson, samt alla andra som har hjälpt och uppmuntrat mig i mitt arbete.

Uppsala i april 1984.

Årad Bondesson.

## 2. INLEDNING

### 2.1. Mål

Användningen av kemiska bekämpningsmedel inom jordbruket kan betraktas från många synpunkter, bl a följande

- Från miljö- och kostnadssynpunkter är det angeläget att använda så små mängder kemiska preparat som möjligt.
- Från effektivitets- och arbetskostnadssynpunkter är det angeläget att använda appliceringsutrustning med så hög kapacitet som möjligt.
- Från jordpackningssynpunkt bör sprutekipaget vara så lätt som möjligt och försett med anpassad däck-/hjulutrustning samt förorsaka så få meter körspår som möjligt.
- Vid arbete i stående gröda ska sprutekipaget åstadkomma så små körskador på denna som möjligt, vilket därmed minskar kostnaderna för bekämpningsåtgärden.

Detta medför att följande krav kan ställas på lantbrukssprutan:

- Stor appliceringsprecision.
- Stor arbetsbredd.
- Hög körhastighet.
- Liten vätskemängd per hektar.

Det andra och det tredje kravet står i mer eller mindre motsatt förhållande till det första. För att möjliggöra en minskning av erforderliga preparatmängder och/eller en ökning av kapaciteten krävs en appliceringsutrustning som förmår placera sprutvätskan på dess mål med stor precision. Sprutbommens avvikelser från sitt avsedda arbetsläge utgör en för blotta ögat oftast fullt synlig felkälla. Dessutom medför stora bomrörelser även risk för mekaniska skador på bom, upphängningsanordning och spridare.

Avsikten med det här arbetet är att beskriva bommens rörelser och deras inverkan på bekämpningsresultatet. Dessutom beskrivs olika tekniska lösningar för en förbättrad lägeshållning av bommen och resultaten av dessa.

Arbetet är utfört som en studie och sammanställning av förekommande och tillgänglig litteratur inom ämnesområdet "bomrörelser".

### 2.2. Historik och bakgrund

Tidiga försök, utförda under näst intill ideala förhållanden, vid NIAE i England 1963 och 1964 (Nation 1978 b, 1980, 1982 a) visade att mycket stora variationer kunde förekomma i vätskefördelningen från lantbrukssprutor.

En efterföljande försöksserie 1967 som utfördes under praktiska förhållanden på olika gårdar i England (Nation 1978 b 1980, 1982 a), visade ännu större fördelningsvariationer. I de här försöken fördelade sig variationskoefficienterna mellan 20 % och 78 %. Det lägsta enskilda värdet i ett försök var 7 % av försökets medelvärde och det högsta värdet var 478 %. Minsta förhållandet mellan högsta och lägsta enskilda värde, inom ett och samma försök, var 3:1, största förhållandet var 44:1 och medelförhållandet var 13:1.

Vid försöken gjordes även flödesmätningar för de enskilda spridarna på varje spruta och de använda bomhöjderna mättes. Förhållandet mellan minsta och största flöde översteg sällan 2:1. Härav drog man slutsatsen att varierande flödesmängd från spridarna och bristande fördelningsjämnhet längs bommarna endast i mindre omfattning bidrog till de uppmätta variationerna.

Man konstaterade även att stora bomrörelser ofta kunde förekomma hos vissa sprutor, samt att det var svårt att visuellt bedömma omfattningen av dessa rörelser, speciellt i horisontal riktning. Ur undersökningens resultat drogs dessutom slutsatsen att man behövde utveckla en särskild mätmetod för att kunna studera bommens rörelser i fält.

I ett irländskt inomhusförsök (Rice 1967) med en traktorburen spruta undersöktes sambandet mellan bommens rörelser och variationerna i sprutvätskans fördelning. Traktorns hjul vid dess ena sida kördes över ett 50 mm högt kilformat hinder. Prov togs mellan bommens yttre spridare och man fann att vätskemängden varierade mellan 0,73 och 1,28 gånger det uppmätta medelvärdet.

Liknande holländska försök (Speelman 1973) visade att de maximala avvikelsernas storlek varierade mellan 33% och 135% av uppmätta medelvärden. Försöken utfördes med fem olika sprutor, varav endast en hade stumt upphängd bom. Försöken omfattade även olika spridartyper och mätningarna gjordes under bommarnas yttre spridare.

Sprutbommens rörelser, som störande faktor, har uppmärksammats även i andra sammanhang. I samband med en norsk undersökning (Rød 1978) av 32 lantbruks-sprutor på olika gårdar, gjordes en generell bedömning av sprutornas tillstånd. Ca 40% sprutbommarna bedömdes vara instabila.

I slutdiskussionen vid seminariet "Nordisk Projekt - Utredning och undersökningar av växtskyddsutrustning, - Biologi - teknik - arbetsmiljö", som hölls vid Sveriges lantbruksuniversitet i juni 1981 (Hagenvall & Svensson 1982), enades deltagarna om ett antal konkreta åtgärdsförslag där alla krafter borde sättas in för förbättring av lantbrukssprutorna. Ett av dessa förslag var - "Bommen bör konstrueras så att den kan följa markens ojämnheter".

### 3. BOMRÖRELSERNAS KARAKTÄR

Bommens rörelser under besprutningsarbetet kan betraktas utgöra resultatet av samverkande momentala vertikala och horisontala hastighetsvektorer vars belopp och riktning kontinuerligt förändras. Genom dessa riktningsändringar kommer bomrörelserna att ske kring ett oscillationscentrum vilket motsvaras av origo i ett tredimensionellt koordinatsystem, vars axlar är vertikalt och horisontalt riktade. Bommens horisontala rörelser tvärs sprutekipagets körriktning är relativt begränsade och av underordnad betydelse för resultatet av besprutningsarbetet. De utelämnas därför i det här arbetet.

Under besprutningsarbetet flyttas det här koordinatsystemet i ett bestämt höjdläge över marken med sprutekipagets körhastighet och på ett bestämt avstånd till detta. Olika undersökningar (Speelman 1973, Nation & Holden 1976 a) visade dock att koordinatsystemet kunde komma att avvika från dessa lägen pga asymmetrisk fördelning av bomändarnas lägesavvikelser.

Bommens rörelser i vertikal riktning medför att dess höjdläge över marken och växterna kontinuerligt förändras. Bommens horisontala rörelser överlagrar sprutekipagets körhastighet och medför att dess momentana hastigheter i förhållande till marken och växterna kontinuerligt varierar. Jämför figur 3.

Dessa läges- och hastighetsvariationer sker huvudsakligen oregelbundet och slumpartat då sprutekipaget körs under normala arbetsförhållanden (Nation & Holden 1974, Schmidt-Ott 1976, Nation 1982 a). Bommens rörelseförlopp kan därför normalt inte beskrivas med matematiska funktionsuttryck.

#### 4. FAKTORSAMVERKAN

Även en översiktlig studie av "ämnet" kemiska bekämpningsåtgärder ger snabbt vid handen att de biologiska och företagsekonomiska resultat som uppnås med sådana åtgärder, samt de miljöbelastningar som förorsakas av dem, styrs av ett omfattande faktor- och sambandskomplex. Trots omfattande forskning inom detta komplex, är kunskaperna om vissa av dess delar fortfarande ganska begränsade (Hagenvall & Svensson 1982).

I ett försök att belysa bomrörelsernas betydelse för dessa resultat respektive miljöbelastningar, har en sammanställning gjorts över de delar av faktor- och sambandskomplexet som direkt eller indirekt berörs av bommens rörelser (fig 1). Observera att sammanställningen utgör ett urval av det totala komplexet!

För att uppnå acceptabla behandlingsresultat måste värdena av komplexets enskilda faktorer hållas inom vissa toleransområden. I viss mån kan dock ett felaktigt värde av en faktor kompenseras genom förändring av värdet av en eller flera andra faktorer. I strävan efter ökad kapacitet och minskade preparat- och vätskekostnader reduceras de enskilda faktorernas toleransområden, liksom möjligheterna till kompensering mellan olika faktorer. Dessa förhållanden medför bl a höga krav på enskilda maskindelars prestanda och kvalitet hos lantbrukssprutan. Samtidigt ökar även kraven på grundläggande kunskaper om faktor- och sambandskomplexet för den enskilde användaren, rådgivaren, produktutvecklaren, forskaren m fl. I denna strävan efter förbättrade resultat kommer i framtiden även behovet av detaljerad information om biologiska, fysikaliska och meteorologiska förhållanden att öka.

Målet för all spridning av växtskyddsmedel är, enligt Nordby (1979 d), att placera vätskan eller dropparna där den eller de gör störst möjliga verkan. Svårigheten är att uppnå maximal täckning av behandlingsobjektet/-en med minsta möjliga vätskemängd, samtidigt som risken för vindavdrift bör vara minimal. Denna uppfattning stöds av Göhlich (1978), som menar att de negativa konsekvenserna för behandlingsresultatet av ojämn vätskefördelning ökar vid användning av små vätskemängder.

##### 4.1. Förhållanden påverkbara vid bommen

Grundläggande förutsättningar för jämn fördelning av en bestämd mängd vätska över en yta av given storlek är, att vätskan fördelas jämnt både längs och tvärs sprutekipagets körriktning, samt att arbetet utförs med exakt kördraagsanslutning.

Jämn fördelning av vätska längs sprutekipagets körriktning förutsätter att denna passerar genom ekipagets spridare med ett bestämt flöde direkt proportionellt mot ekipagets körhastighet enligt:

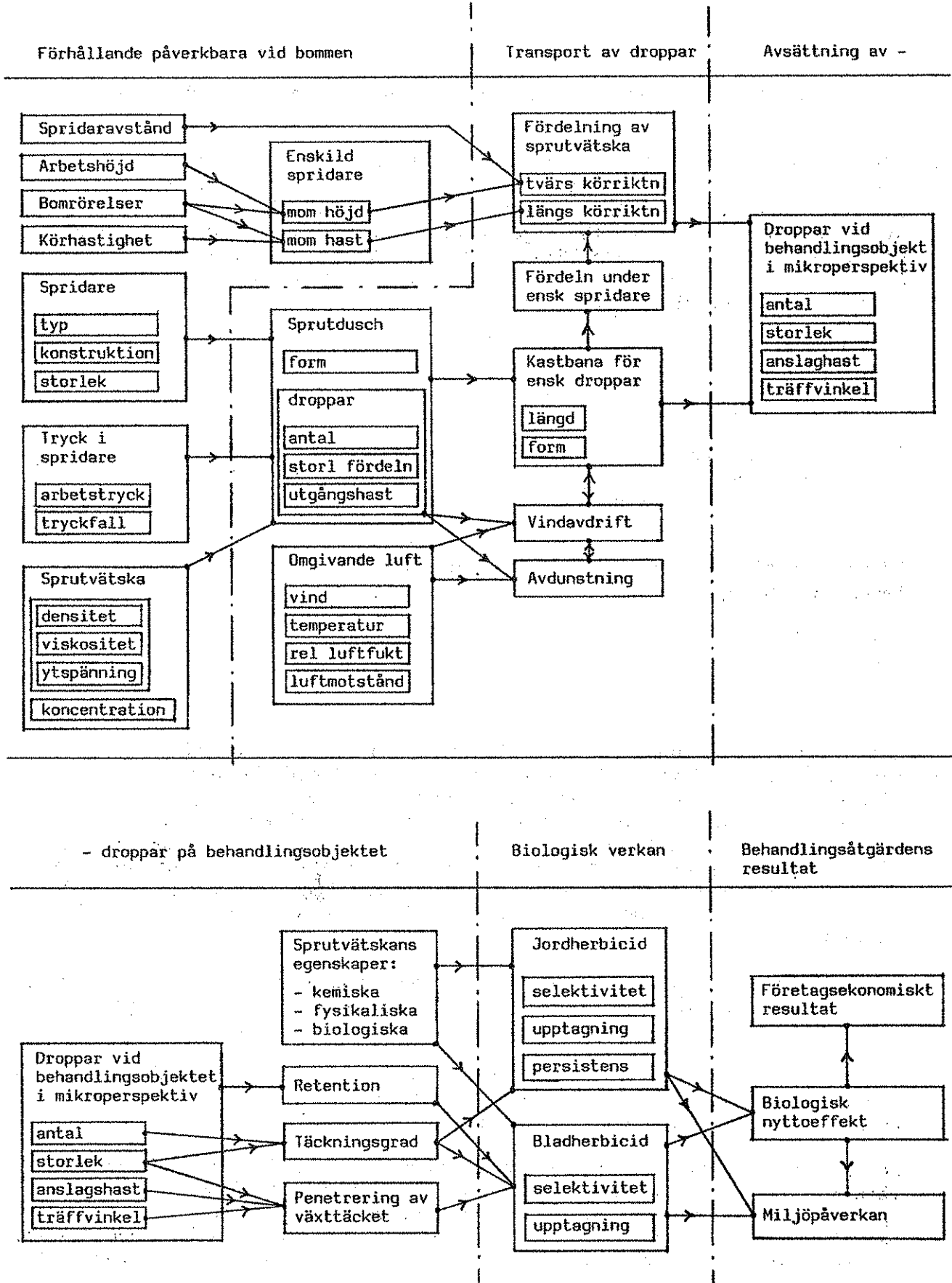
$$q = v \cdot d \cdot b$$

$$q = \text{flöde (m}^3/\text{s)}$$

$$v = \text{körhastighet (m/s)}$$

$$d = \text{dos (m}^3/\text{m}^2)$$

$$b = \text{arbetsbredd (m)}$$



Figur 1. Faktor- och sambandskomplex (egen sammanställning).



Detta förhållande ger att dosen är omvänt proportionell mot körhastigheten vid konstant flöde.

Vätskeflödet genom en hydraulisk spridare beror huvudsakligen av vätskestrycket i denna, spridaröppningens area och vätskans densitet. Även spridartyp, spridarkonstruktion och vätskans viskositet påverkar flödet. Med mindre avvikelser bestäms vätskeflödet genom hydrauliska spridare av de allmänna strömningslagarna (Svensson 1976). Flödet är därför proportionellt mot munstycksarean och roten ur vätskans tryck, men omvänt proportionellt mot roten ur dess densitet, vilket ger:

$$q \sim \frac{A \cdot \sqrt{p}}{\sqrt{\rho}}$$

A = spridaröppningens area (m<sup>2</sup>)

p = vätskestrycket (Pa)

ρ = vätskans densitet (kg/m<sup>3</sup>)

Känner man flödet q<sub>1</sub> för trycket p<sub>1</sub>, kan flödet q<sub>2</sub> beräknas för ett nytt tryck p<sub>2</sub>, enligt:

$$\frac{q_1}{q_2} = \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} ; \quad q_2 = q_1 \sqrt{\frac{p_2}{p_1}}$$

Jämn vätskefördelning tvärs sprutekipagets körriktning förutsätter att vätskan fördelas jämnt under sprutbommen i dess längdriktning. Denna fördelning utgör resultatet av de enskilda spridarnas sammanlagda flöden och fördelningar i denna riktning. Därför kan endast små flödesvariationer accepteras mellan de enskilda spridarna. I Tyskland (Biologische Bundesanstalt 1967) ställer man kravet att kapaciteten för nya spridare endast får avvika +/- 5 % från angivet värde. Nordby (1977) anser dock att variationskoefficienten för 25 spridare ger en bättre uppfattning om spridarnas kapacitetsvariationer.

Vätskefördelningen längs bommen kan även påverkas av tryckfall i spridarledningarna. Enligt Tønnesen (1978) bör inte större tryckfall längs bommen accepteras än 10-15 %. Detta motsvarar 5-8 % reducerat flöde.

De individuella fördelningarna från bommens spridare, projicerade på ett plan i bommens längdriktning, måste vara enhetliga och ha sådan form att de kollektivt ger en jämn vätskefördelning.

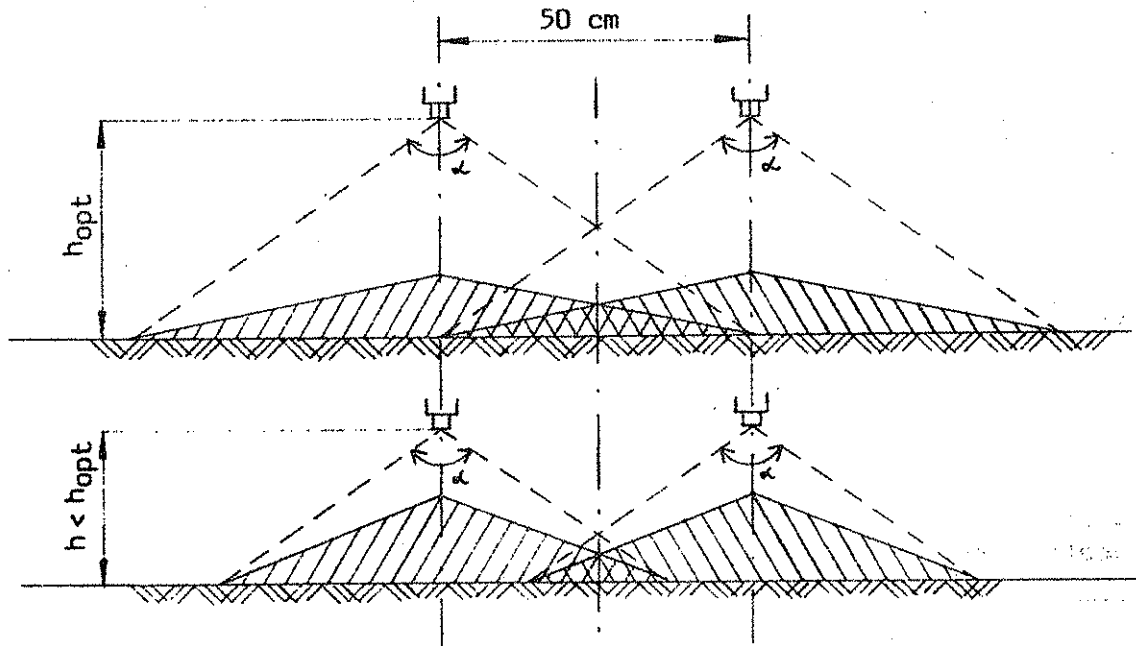
Fördelningen av sprutvätskan under en hydraulisk spridare sker genom finfördelning av vätskan till droppar i en sprutdusch vars form bl a beror av spridartyp, spridarkonstruktion och vätskestryck i den enskilda spridaren. Dessutom påverkas den av vätskans viskositet och ytspänning (Svensson 1976). Det förekommer även tvåhålsspridare som ger två sprutduschar (Nyström 1981).

Vätskefördelningen från en spridare kan bestämmas genom att man låter den sprida sin dusch över ett sprutbord, bestående av ett antal inbördes lika breda parallella kanaler. Vanligen är kanalernas bredd 50 mm (Nordby 1979 a,

Nyström 1981), men även 25 mm delning förekommer (Eriksson 1975, Nation 1976 a, Nilsson 1983). Vätskan från kanalerna samlas upp i mätglas, ett för varje kanal, och resultatet kan presenteras i form av ett kurv- eller stapeldiagram. Normalt bestäms en spridares vätskefördelning tvärs dess avsedda körriktning, monterad på en sprutbom.

Sprutduschens utbredning, på ett givet avstånd under spridaren, påverkas av duschens toppvinkel, vilken utgörs av vinkeln mellan dess tangenter vid spridaröppningen. I sin tur kan toppvinkeln påverkas av vätsketrycket. Ökat tryck ger oftast en vidgad sprutdusch, dvs dess toppvinkel ökar (Göhlich 1968, Svensson 1976, Tønnesen 1978).

Härav följer att utbredningen av sprutduschens träffbild på avsättningsplanet ökar, om spridarens höjd över detta ökas. Detta medför att graden av överlappning mellan enskilda sprutduschars träffbilder från en bom varierar beroende av bommens höjdläge över avsättningsplanet (fig 2). I sin tur medför detta att jämnast vätskefördelning erhålls då bommen befinner sig i ett bestämt höjdläge över avsättningsytan (Nation 1976 a, Tønnesen 1978, Nordby 1979 b, Porskamp 1980), jämför punkt 4.4.



Figur 2. Överlappningens höjdberoende (omarbetning efter Göhlich 1968).

Olika spridartyper ger fördelningar med olika former. Den i Sverige numera vanligast leveransmonterade typen - spaltspridaren med  $110^\circ$  toppvinkel - ger vanligen en triangelformad fördelning. Vid hög placering av spridaren kan fördelningen övergå till trapetsform. Virvelkammarspridarna, vilka förekommer i två olika typer, ger antingen en ihålig eller fylld duschkon. Av dessa båda typer är den med ihålig duschkon vanligast förekommande. Denna ger en triangelformad eller trapetsliknande fördelning.

Topparna i en M-fördelning visar sig vara svåra att eliminera oavsett kombination av bomhöjd eller spridaravstånd (v d Weij et al 1972, Nation 1976 a). Trapetsformade fördelningar ger en tillfredställande sammanlagd fördelning, vilken dock är ganska känslig för höjdlägesförändringar av bommen. Triangelformade fördelningar ger däremot god anslutning, vilket resulterar i en jämn

fördelning för en bom försedd med spaltspridare. Denna fördelning är även tämligen okänslig för höjdlägesförändringar av bommen över dess optimala höjdläge (Göhlich 1968, Nation 1976 a). Jämför punkt 4.4. figur 6.

Formen av sprutduschen från en centrifugalspridare beror av vätskeflödet, spridartallrikens (-koppens) varvtal och diameter, vätskans fysikaliska egenskaper samt spridarens framföringshastighet (Olsson 1983). En horisontalt spridande centrifugalspridare ger en utpräglad M-fördelning. Dessa faktorer gör att en riktigt jämn fördelning aldrig kan uppnås under en sprutbom försedd med denna spridartyp. Det är dessutom svårt att välja rätt kombination av arbetshöjd och avstånd mellan spridarna.

Fördelningen av vätska från en stillastående bom mäts med ett sprutbord liknande det som används för mätning av fördelningen från enskilda eller ett mindre antal spridare. Det här sprutbordet sträcker sig vanligen under bommens hela arbetslängd. Uppsamling under längre bommar kan dock delas upp i två omgångar. Vanligen är kanalerna 100 mm breda (Hagenvall 1978, Porskamp 1980).

Som mått på fördelningsjämnheten används vanligen begreppet variationskoefficient (vk). Detta utgörs av standardavvikelsen i förhållande till observationsmedeltalet, uttryckt i procent enligt:

$$vk = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \cdot 100$$

Ett försök att ge det här begreppet en praktisk innebörd har gjorts av Nordby (1979 b) och visas här i tabell 1.

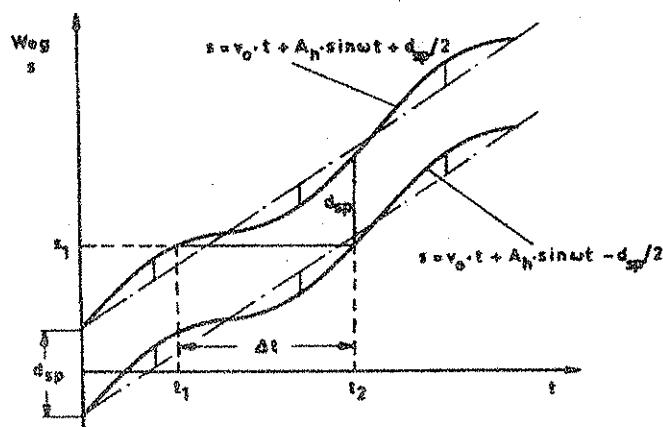
Tabell 1. Variationskoefficientens innebörd (Nordby 1979 b)

Variationskoefficient	Innebörd uttryckt i ord
< 10	Synnerligen god
10 - 12	Mycket god
12 - 16	God (tillfredställande)
16 - 20	Användbar (måttlig)
> 20	Inte användbar

Träffbilden av en sprutdusch från en virvelkammarspridare har en cirkulär form, vilket medför att vätskefördelningen är lika oavsett om den mäts längs eller tvärs bommens längdriktning. Däremot har träffbilden från en spaltspridare en avlång eller elliptisk form. Denna spridare monteras på sprutbommen så att träffbildens längdaxel sammanfaller eller bildar 5°, alternativt 10°, vinkel med bommens längdriktning. Detta medför att avsättningen

av vätska under en stillastående bom, försedd med spaltspridare, sker på ett smalare fält under denna än om den varit försedd med virvelkammerspridare.

Bommens rörelser kan enligt punkt 3 beskrivas som kontinuerliga höjdläges- och hastighetsförändringar av bommen, i förhållande till marken och växterna. Dess höjdlägesändringar kommer att direkt påverka fördelningen av sprutvätskan i bommens längdriktning enligt tidigare redovisade förhållanden (fig 2). Dess hastighetsförändringar medför att sprutduscharna under lika långa tidsenheter kommer att passera över olika stora ytor, eller annorlunda uttryckt - lika stora ytor (sträckor) passerar av spridarna under olika långa tider (fig 3). Detta resulterar i ojämn fördelning av sprutvätskan, sedd i sprutekipagets körriktning. Om bommens maximala svängningshastighet i horisontal riktning är lika stor som sprutekipagets körhastighet medför detta att dess hastighet relativt marken kommer att variera mellan helt stillastående och dubbla körhastigheten. Överskrider bommens maximala svängningshastighet körhastigheten medför detta, att den lokalt kommer att passera samma ytavsnitt tre gånger vid en överfart av sprutekipaget.



Figur 3. Tidsåtgången  $\Delta t$  för sprutduschen att passera punkten  $s_1$  (Schmidt-Ott 1976).  $d_{sp}$  = utbredningen av sprutduschen i sprutekipagets körriktning.  $A_h$  = svängningsrörelsens horisontala amplitud. Weg = sträcka.

Sprutbommens rörelser resulterar även i att vätskedropparna i sprutduschen kommer att färdas utefter kastbanor av olika längd och form beroende av bommens, och därmed spridarnas, momentana höjdlägen och hastigheter. Ett högt läge kombinerat med hög hastighet ger långa kastbanor, medan låg höjd och låg hastighet ger korta kastbanor. Kastbanornas längd påverkas även av dropparnas utgångshastighet, vilken enligt de allmänna strömningslagarna ökar med ett ökat vätsketryck.

Alla hydrauliska spridare alstrar heterogena sprutduschar med mycket stor skillnad mellan de största och de minsta dropparna. I första hand är droppstorleken beroende av spridartyp, spridarkonstruktion, vätskemängd och tryck. Men även vätskans viskositet och ytspänning påverkar droppstorleken (Svensson 1976). Vanligen ger spaltspridare vätskeduschar med större droppar än virvelkammerspridarna. Ett ökat vätsketryck för en och samma spridare ger mindre

droppar och ett konstant vätsketryck men ökad spridarstorlek ger större droppar (Porskamp 1980). Enligt Svensson (1976) ger en spridare med stor toppvinkel mindre droppar än en spridare med liten toppvinkel.

Sprutduschens sammansättning av droppar med olika storlekar beskrivs vanligen med dess volymmediandiameter VMD eller massmediandiametern MMD, mätt i mikrometer ( $\mu\text{m}$ ). Måttet anger gränsen för en uppdelning av sprutduschens sammanlagda vätskevolym i två lika stora delar, varav dropparnas diametrar i ena delen understiger den här gränsen och i andra delen överstiger denna. Andra mått för droppstorleken i en sprutdusch är dropparnas medeldiameter NMD och ytmedeldiametern SMD (Svensson 1976, Nordby 1979 a).

#### 4.2. Omgivande luft

Under transporten från spridarna till målet kommer sprutvätskan, och därmed dropparna i sprutduscharna, att utsättas för påverkan av den omgivande luften. Då vätskan lämnar en spridare och dropparna just har bildats har de alla samma hastighet, men pga luftens motstånd kommer denna i varierande grad att bromsas upp. Små droppar utsätts för större hastighetsreduktion än stora, vilket medför att deras transporttid ökar i förhållande till de större dropparnas. Härigenom kommer de i högre grad att utsättas för vindavdrift och avdunstning.

Enligt Zaske (1973) reduceras dropparnas hastighet från en utgångshastighet av 20 m/s till svävshastighet för droppar med mindre diameter än 150  $\mu\text{m}$  innan de har transporterats 50 cm i stillastående luft. En droppe med diametern 100  $\mu\text{m}$  uppnår sin svävshastighet 0,27 m/s inom loppet av 0,1 s och har då färdats 0,2 m. En droppe med diametern 500  $\mu\text{m}$  färdas 50 cm på 0,03 s och har efter denna sträcka hastigheten 11 m/s. Dessa iakttagelser bekräftas av Matthews (1979), som även visar att svävshastigheten reduceras mycket starkt för minskade droppstorlekar.

Under transporten genom luften utsätts dropparna för avdunstning. Omfattningen av denna beror bl a av luftens temperatur och relativa fuktighet samt av droppstorleken. Heidt (1976) visar att volymförlusterna pga avdunstning ökar mycket kraftigt för droppar mindre än 100-150  $\mu\text{m}$ .

Den omgivande luftens rörelser kan orsaka störningar i vätskefördelningen under sprutbommen och ge upphov till vinddriven sprutvätska, som medför ohälsosam arbetsmiljö för sprutföraren. Vinddriven sprutvätska kan även ge upphov till skador utanför det fält som behandlas. Risken för vindavdrift ökar med ökad vindhastighet, ökad bomhöjd och ökat vätsketryck, vilket som tidigare nämnts reducerar droppstorleken.

I ett av inledningsanförandena till ett seminarium kring växtskyddsutrustning, inom ramen för "Nordiskt projekt", anger Ole Permin (Hagenvall & Svensson 1982) att mindre än 1 % av sprutvätskan bör fördelas i droppar mindre än 150  $\mu\text{m}$  för att hålla avdriften på en rimlig nivå.

Norska undersökningar av Nordby & Skuterud (1975) visade att den totala avdriften från ett kördrag med en spruta med 10 m arbetsbredd varierade mellan 1,4 % och 37 % beroende av olika förhållanden. För spaltspridare med bomhöjden 40 cm, vätsketrycket 2,5 bar och vindhastigheten 1,5 m/s erhöles den lägsta vindavdriften 1,4 %. Vid ökad vindhastighet, till 4 m/s, ökade vindavdriften till ca 7 %. 80 cm bomhöjd, 2,5 bar och 1,5 m/s gav ca 10 % vindav-

drift och vid samma förhållanden men ökad vindhastighet till 4 m/s erhöles ca 14 %. En ökning av trycket till 10 bar resulterade överlag i ökad vindavdrift. Sämsta resultatet 37 % erhöles vid 10 bar, 80 cm och 4 m/s. I undersökningarna registrerades vinddriven sprutvätska på upp till 150 m och 200 m avstånd från ett kördrag.

Med utgångspunkt från undersökningen ger Nordby (1979 e) följande rekommendationer för minsta möjliga avdrift:

1. Spridarhöjd 40 cm.
2. Ej högre arbetstryck än nödvändigt, dvs högst 2,5 bar för spaltspridare.
3. Vindstilla, helst ej över 3 m/s. Man bör inte spruta vid vindhastigheter över 5 m/s, även om övriga risker för avdrift och skador är små.

Även svenska laboratorieundersökningar (Eriksson 1975, Nyström 1981) visade att risken för avdrift ökar markant vid ökad bomhöjd, ökad lufthastighet och ökat arbetstryck.

Porskamp (1980) gjorde enkla laboratieförsök som visade vindens inverkan på vätskefördelningen under en bom (fig 4). En luftström riktades tvärs över ett sprutbord och en bom monterades över detta i 60° vinkel mot luftströmmen. Mätningarna gjordes under fyra spridare, vilka träffades av luftströmmen. Spridarhöjden var 50 cm för spaltspridarna, 70 cm för virvelkammerspridarna och likaså 70 cm för tvåkammerspridarna, vilka dessutom lutade 30° bakåt i vindriktningen.

Sprutduschen från en centrifugalspridare ger under normala arbetsförhållanden ett betydligt smalare droppstorleksspektrum än en hydraulisk spridare (Olsson 1983). Vanligen eftersträvas en sprutdusch med mindre massmediandiameter (MMD) än vad hydrauliska spridare normalt ger. Genom centrifugalspridarduschens stora utbredning och dess smala droppstorleksspektrum kommer den dock som helhet att deformeras mer av vindpåkänningar, än en sprutdusch från en hydraulisk spridare.

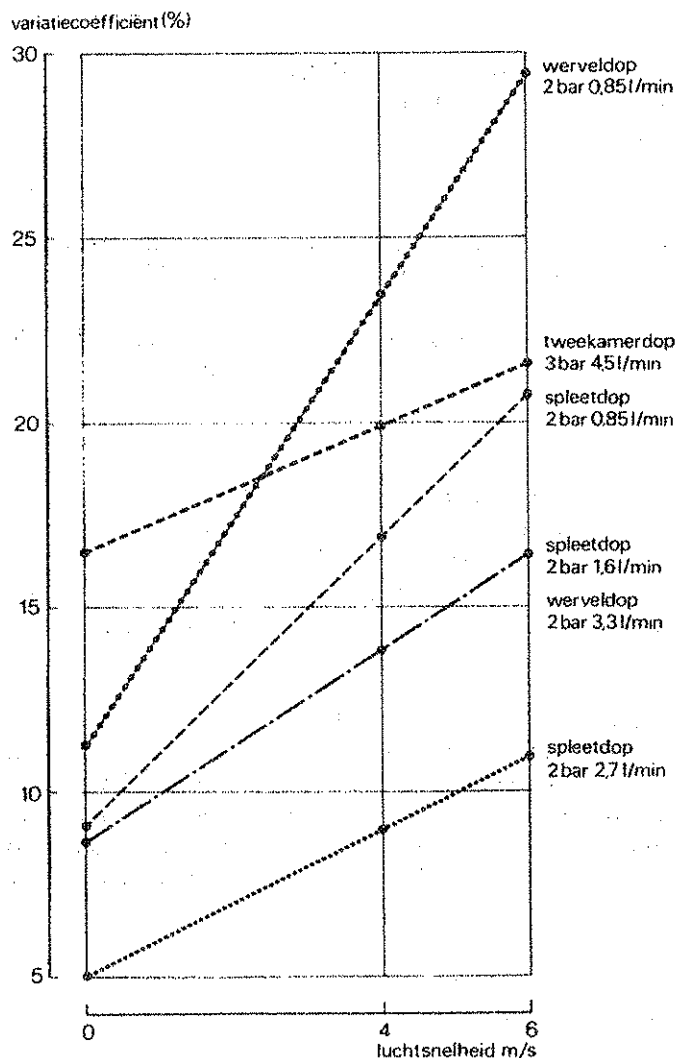
#### 4.3. Avsättning och resultat

Efter dropparnas färd från spridarna genom den omgivande luften mot målet kan sprutduscharnas former, sammansättningar och egenskaper väsentligen ha förändrats. Detta kan förorsaka fördelningsvariationer. Dropparnas storleksfördelning kan ha påverkats, liksom deras anslagshastigheter och anslagsvinklar mot målobjektet. Sammantagna kan dessa faktorer och förhållanden påverka täckningen av målobjektet/-en, retentionen och penetreringen av växttäcket. I sin tur påverkar dessa förhållanden som selektivitet, upptagning och persistens, vilka direkt påverkar den biologiska effekten av bekämpningsåtgärden.

Det företagsekonomiska resultatet av en kemisk bekämpningsåtgärd utgör summan av intäkter och kostnader av åtgärdens biologiska nyttoeffekt minskad med de sammanlagda kostnaderna för åtgärden. Detta resultat utgör härmed det primära motivet för åtgärden sedd ur den enskilde användarens synvinkel.

De miljöbelastningar som uppstår till följd av kemiska bekämpningsåtgärder är i hög grad beroende av den precision som erhålls med använd appliceringsteknik och de totala mängder aktiv substans som förbrukas. Ökad appliceringsprecision och minskad total mängd aktiv substans minskar direkt de miljö-

belastningar som uppstår till följd av att kemiskt preparat hamnar vid sidan av målet.



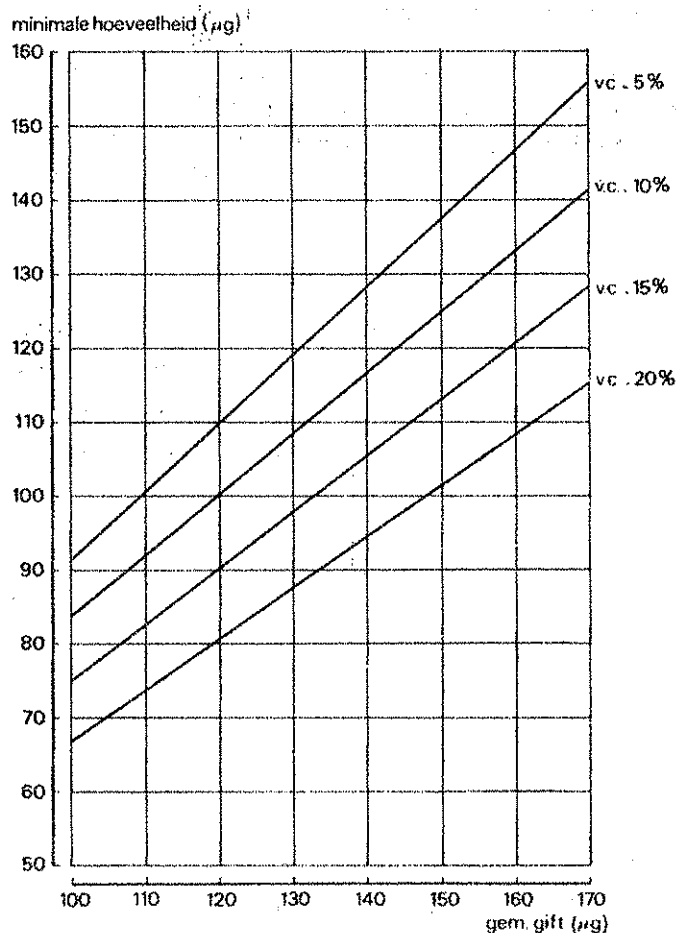
Figur 4. Lufthastighetens inverkan på vätskefördelningen från en sprutbom (Porskamp 1980). Lufthastighet = lufthastighet. Werveldop = virvelkammerspridare. Tweekamerdop = tvåkammerspridare. Spletdop = spalt-spridare.

Ett försök att beräkna de möjligheter till minskade preparatmängder, som kan uppnås med hjälp av förbättrad appliceringsteknik har gjorts av Porskamp (1980). Han gjorde antagandet, att fördelningen av sprutvätskan sker på ett sådant sätt, att värdena för de avsatta mängderna på små mätytor 10 x 10 cm normalfördelas. Vidare gjorde han antagandet, att mängderna på 95 % av mätytorna måste överstiga ett visst minimivärde för att bekämpningsåtgärden ska vara effektiv.

Vid ett medelvärde av 100 µg per mätyta och variationskoefficienten (vk) = 5 % är standardavvikelsen (s) = 5 µg. På 95 % av mätytorna erhålls då värden som överstiger minimimängden  $100 - (1,64 \cdot 5) = 91,8$  µg. Figur 5 visar hur

minimängden för olika vk ökar med en ökad medelmängd. Om värdena för 95 % av mätytorna skall överstiga 100  $\mu\text{g}$  vid vk = 5 % erfordras medelmängden 109  $\mu\text{g}$ . Vid vk = 10 % erfordras 120  $\mu\text{g}$  och vid vk = 20 % erfordras 149  $\mu\text{g}$ .

Om vk för sprutvätskefördelningen i fält t ex kunde minskas från 20 % till 10 % skulle, enligt de här beräkningarna, mängden sprutvätska kunna reduceras närmare 20 % (149 - 120 = 29  $\mu\text{g}$ ).



Figur 5. Erforderlig medelmängd för att uppnå en bestämd minimimängd på 95 % av mätytorna vid olika variationskoefficienter (Porskamp 1980). Minimale hoeveelheid = minimimängd. Gem gift = medelmängd.

Porskamp (1980) undersökte även fördelningarna från två sprutor dels stillastående inomhus och dels vid köpning i fält. Vk för en 21 m lång bom, med spaltspridare på 80 cm arbetshöjd, ökade från 10 % inomhus till 14 % respektive 18 % i fält, mätt vid mitten respektive ändarna av bommen. En 15 m lång bom, med spaltspridare på 45 cm arbetshöjd, visade 4 % inomhus och 12 % respektive 15 % i fält, mätt enligt ovan. Undersökningarna visade genomgående att vk försämrades i fält.

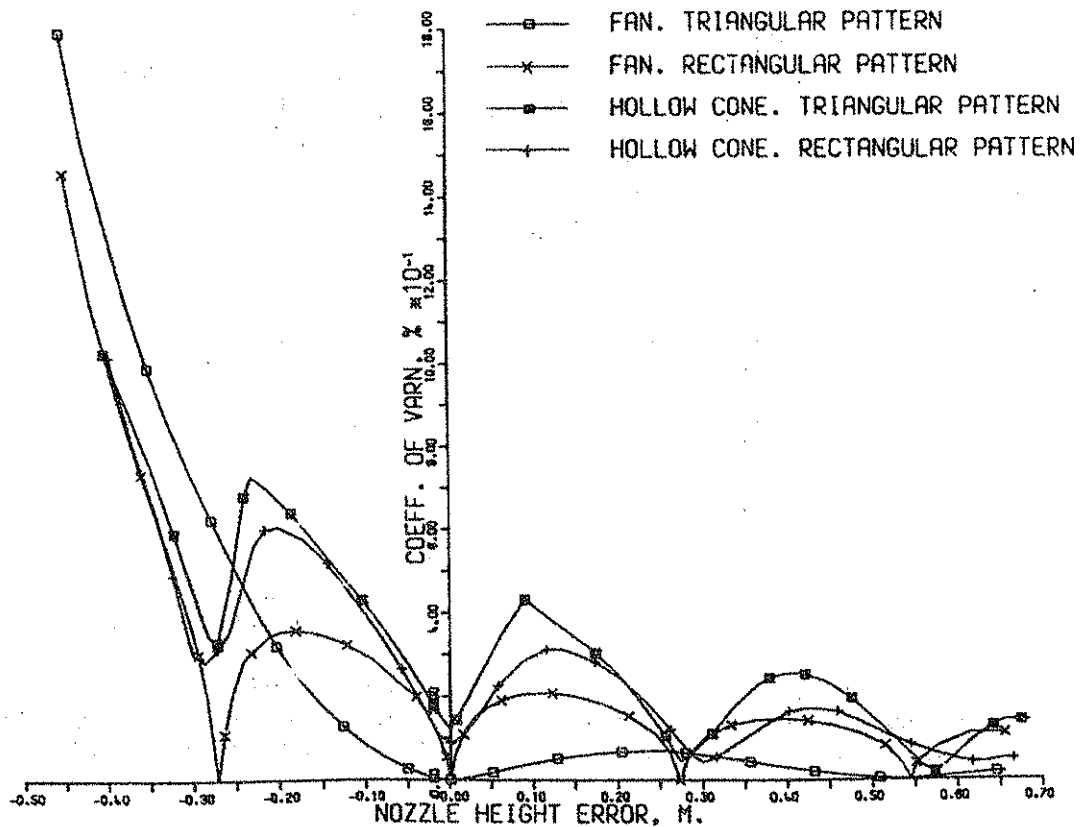
Dessa resultat kan jämföras med resultaten från en svensk konditionsundersökning av 83 lantbrukssprutor, utförd av Hagenvall (1978), vilken visade en genomsnittlig vk = 16,9 % för sprutor med spaltspridare. Variationsvidden var 9,7 - 34,3 %. Motsvarande siffror för sprutor med virvelkammarspridare var



24,9 % respektive 15,5 - 45,6 %. Fördelningsmätningarna utfördes stationärt utomhus.

#### 4.4. Rörelseriktningens inverkan

Vid NIAE i England (Nation 1976 a, b) undersöktes olika spridartypers vätskefördelningar med hjälp av ett sprutborb, med 25 mm kanaldelning. Matematiska uttryck beräknades för beskrivning av fördelningarna. Man gjorde dock antagandet att fördelningarnas utbredningar var direkt proportionella mot spridarnas höjd över sprutbordet. Med en dator beräknades variationskoefficientens beroende av spridarnas höjd över avsättningsplanet för den sammanlagda vätskefördelningen från en tänkt bom försedd med dessa "matematiska" spridare (fig 6). Spridarnas toppvinkel (egentligen spray angle) förutsattes vara  $80^\circ$ . Dessa teoretiska kurvor visade ganska god överensstämmelse med praktiskt uppmätta kurvor (fig 7).



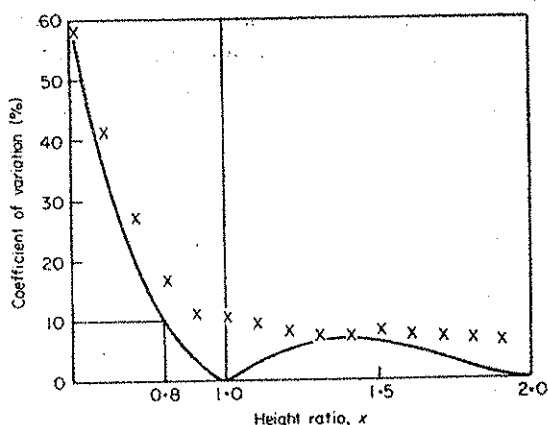
Figur 6. Vätskefördelningens beroende av spridarhöjden för fyra spridartyper - teoretiskt beräknad (Nation 1976 b). Coeff. of varn = variationskoefficient. Nozzle height error = spridarnas höjdavvikelse.

Av dessa figurer framgår att nedåtriktade lägesavvikelser verkar mer störande på fördelningsjämnheten än uppåtriktade. Nation menade att detta förhållande kan kompenseras på två sätt. Antingen genom att bommen placeras något över sin stationärt uppmätta optimala arbetshöjd eller genom att den "optimala"

arbetshöjden behålles men spridarna placeras med inbördes kortare avstånd. För praktiskt bruk rekommenderades det senare eftersom detta inte ökar risken för vindavdrift.

Iyer & Wills (1978) beräknade teoretiskt vätskefördelningens beroende av bommens höjdläge över avsättningsplanet. Dessa beräkningar gjordes för dels en stillastående bom och dels en bom i rörelse. Man förutsatte spridaravståndet 45,7 cm och toppvinkeln (spray angle)  $80^\circ$ .

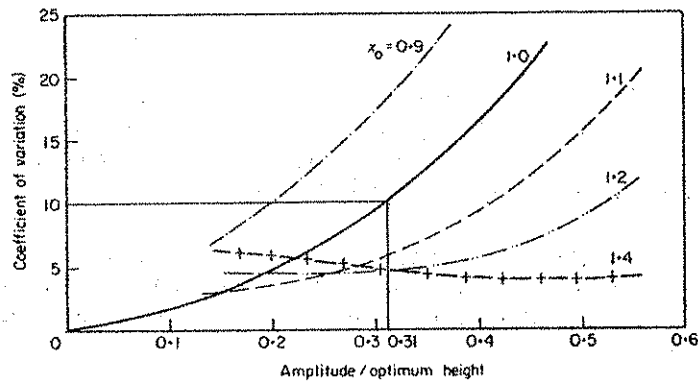
Figur 7 visar variationskoefficienten  $vk$  för vätskefördelningen som funktion av höjdläget för en stillastående bom. Om t ex största tillåtna  $vk = 10\%$  medför detta under dessa förutsättningar, att bommen inte får sänkas under 0,8 gånger dess optimala höjd.



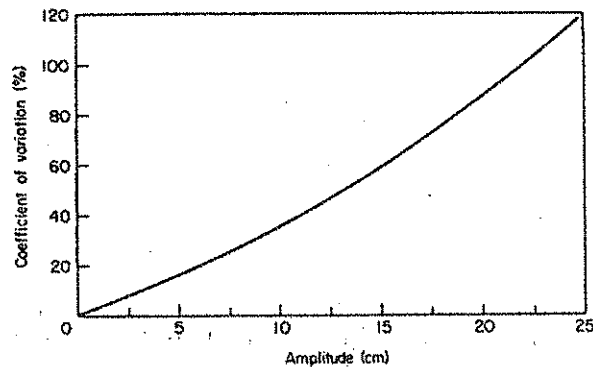
Figur 7. Variationskoefficienter för vätskefördelningen som funktion av bomhöjden (Iyer & Wills 1978). Teoretiskt värde (—), experimentellt värde (x). Spridaravstånd = 45,7 cm. Toppvinkel (spray angle) =  $80^\circ$ . Height ratio = höjdförhållande.

Iyer & Wills menade vidare att beräkningar av vätskefördelningen från en bom i rörelse bör ge mer realistiska uppskattningar av maximalt tillåtna vertikala lägesavvikelser för sprutbommen. För dessa beräkningar gjorde man förändringen att ersätta bommens slumpartade verkliga rörelsemönster med en sinusformad vertikal svängningsrörelse. Figur 8 visar hur  $vk$  varierade för olika amplitud/optimal höjd-förhållanden med svängningsrörelsens oscillationscentrum placerat på olika höjder över avsättningsplanet, i förhållande till bommens optimala arbetshöjd  $x_0 = 1,0$ . För största tillåtna  $vk = 10\%$  erhöles amplitud/optimal höjd-förhållandet = 0,31. Detta motsvarade en amplitud = 16,9 cm för en bom vars optimala höjdläge = 54,4 cm, vilket kan jämföras med  $(1 - 0,8) \cdot 54,4 = 10,9$  cm för en stillastående bom. Figur 8 visar även att  $vk$  minskade för stora amplitud/optimal höjd-förhållanden, om höjdläget för bommens oscillationscentrum ökades.

Iyer & Wills gjorde även beräkningar av de horisontala bomrörelsernas inverkan på vätskefördelningen (fig 9). Man kommenterade att problemställningen krävde ytterligare teoretiska och experimentella undersökningar.



Figur 8. Teoretiskt beräknad variationskoefficient för sprutvätskans fördelning, som funktion av amplituden i vertikala svängningsrörelser (Iyer & Wills 1978).  $x_0$  = oscillationscentrums höjdläge i förhållande till bommens optimala höjdläge. Amplitude/optimum height = amplitud/optimal höjd. Spridaravstånd = 45,7 cm. Toppvinkel (spray angle) =  $80^\circ$ .



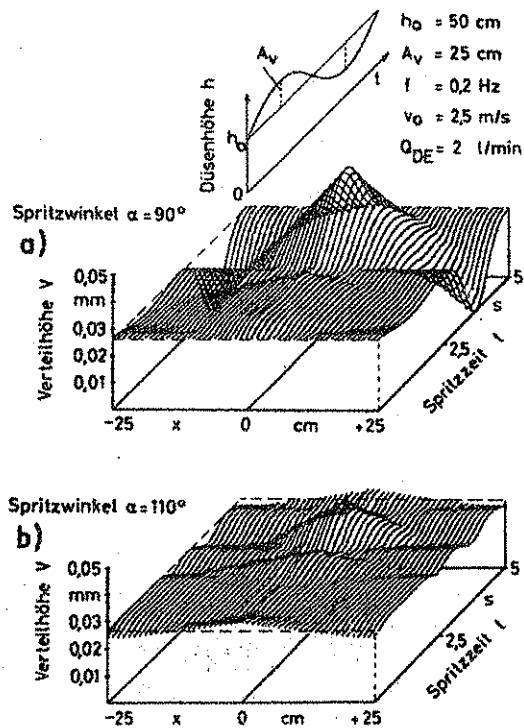
Figur 9. Variationskoefficienten för sprutvätskans fördelning som funktion av amplitudens storlek i en horisontal svängningsrörelse (Iyer & Wills 1978). Körhastighet = 4,8 km/h. Svängningsfrekvens = 2 Hz. Spridaravstånd = 45,7 cm. Toppvinkel (spray angle) =  $80^\circ$ .

Hur fördelningsjämnheten påverkas av spridarnas höjdläge och sprutduscharnas toppvinkel har teoretiskt beräknats och illustrerats av Schmidt-Ott (1976) i figur 10.

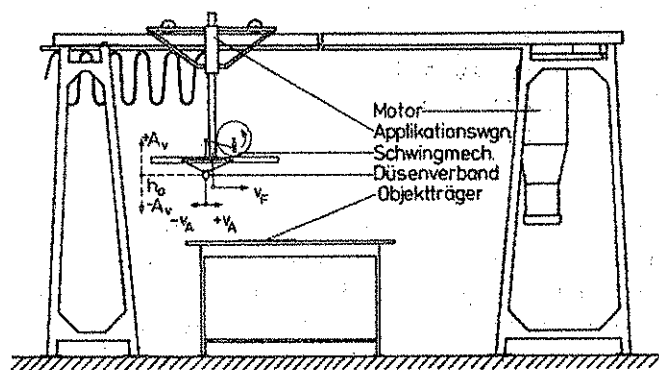
I laboratorieundersökningar studerade Ganzelmeier & Moser (1977) inflytandet av bommens rörelser på vätskefördelningen. De vertikala respektive horisontala rörelsekomponenterna kunde studeras oberoende av varandra under dessa förhållanden.

Försöken utfördes i en försöksanläggning enligt figur 11. Försöksbommen, som var försedd med spaltspridare (uppgift om toppvinkel saknas), bars fram över mätobjekten av en vagn. Denna förflyttades med konstant hastighet = 3 km/h. I förhållande till vagnen kunde bommen fås att utföra vertikala eller horisontala svängningsrörelser med frekvensen 1 Hz och med amplituder upp till 25 cm. Fluorimetriskt mätförfarande användes och mätobjekten hade placerats

under respektive mellan spridarna.

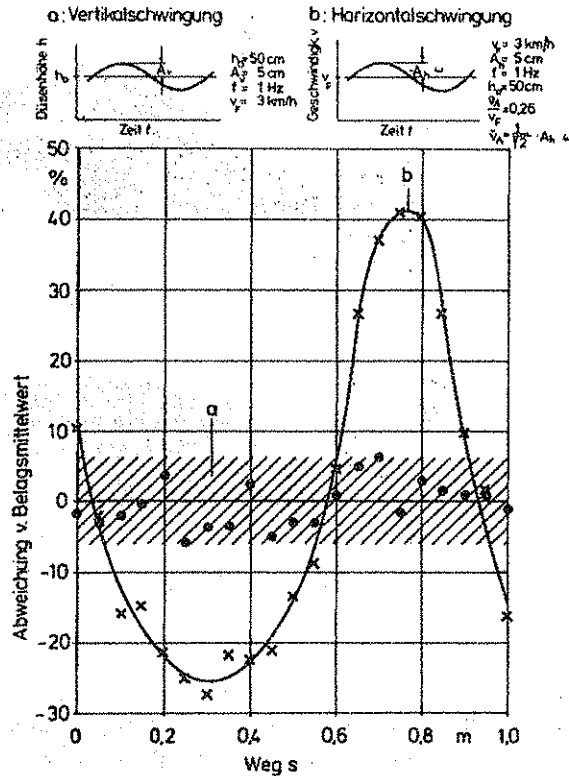


Figur 10. Vätskefördelningen från en vertikalt svängande sprutbom försedd med spaltspridare - teoretisk beräkning (Schmidt-Ott 1976). Spritzvinkel = toppvinkel. Verteilhöhe = vätskemängd. Spritzzeit = spruttid. Düsenhöhe = spridarhöjd.



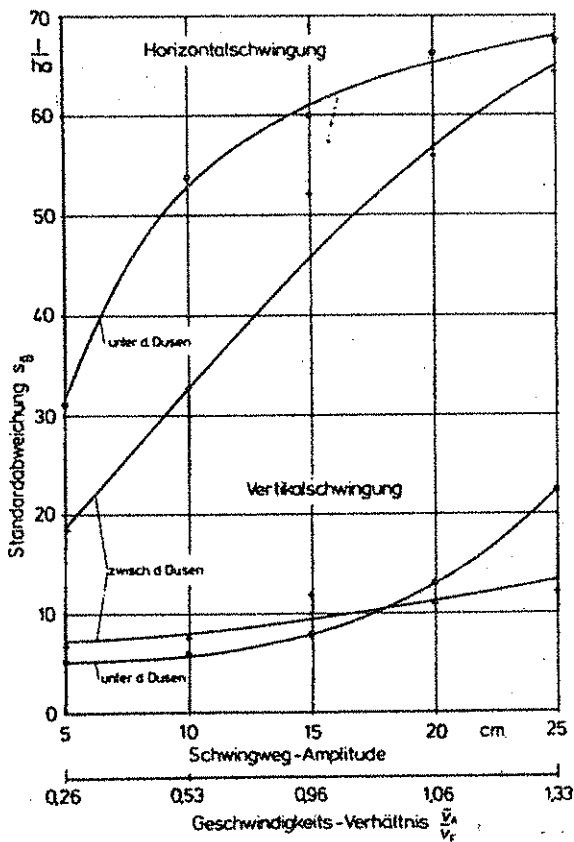
Figur 11. Försöksutrustning för laboratorieundersökningar (Ganzelmeier & Moser 1977). Schwingmech. = svängningsmekanik. Düsenverband = försöksbom. Objektträger = mätytor.  $A_v$  = vertikalsvängningarnas amplitud.  $v_A$  = försöksbommens horisontala svängningshastighet.  $v_f$  = vagnens förflyttningshastighet.

Figur 12 visar avvikelserna från doseringsmedelvärdet (150 l/ha) med avseende på sträckan s. Medan de horisontala svängningarnas inflytande på vätskefördelningen tydligt åteges av kurva b, existerar det ingen entydig kurva för de vertikala svängningarna. En jämförelse mellan de maximala avvikelserna från doseringsmedelvärdet visar att de horisontala svängningarna orsakade ungefär sju gånger större maximala avvikelser än de vertikala.

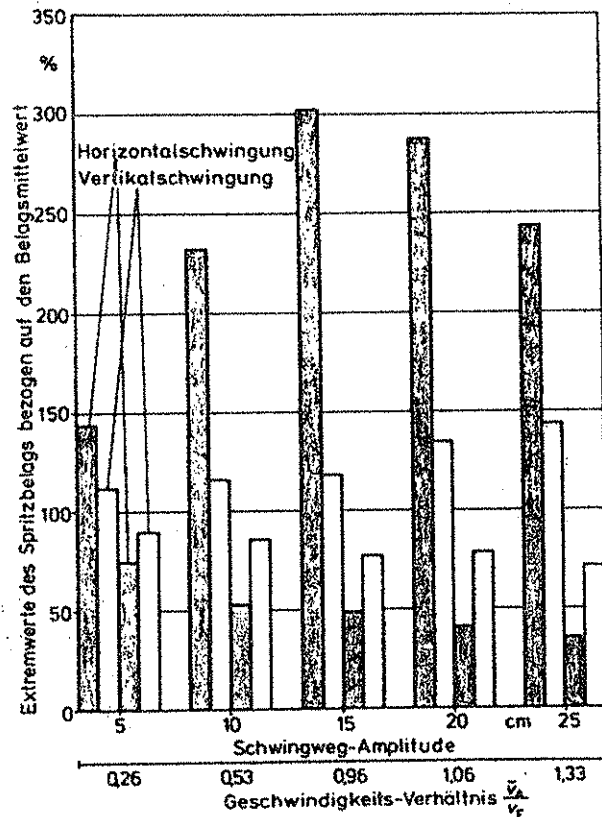


Figur 12. Avvikelser från doseringsmedelvärdet (150 l/ha), mätt under spridarna. Bommen utsattes för vertikala respektive horisontala svängningsrörelser med amplituden 5 cm och frekvensen 1 Hz i förhållande till applikationsvagnen, vilken förflyttades med konstant hastighet (Ganzelmeier & Moser 1977). Abweichung v. Belagsmittelwert = avvikelse från avsättningsmedelvärdet. Düsenhöhe = spridarhöjd. Geschwindigkeit = hastighet. Schwingung = svängning. Zeit = tid. Weg = sträcka.

Figurerna 13 och 14 visar inflytandet av förhållandet mellan bommens medelsvängningshastighet och vagnens körhastighet på vätskefördelningen, där bommens medelsvängningshastighet utgör resultatet av olika amplitudvärden vid konstant svängningsfrekvens = 1 Hz. Med ökat medelsvängnings-körhastighetsförhållande minskar fördelningsjämnheten. De horisontala svängningarna visade sig vara väsentligt mer förödande än de vertikala (fig 13). Figur 14 visar extremvärdena för vätskeavsättningen som funktion av hastighetsförhållandena. Medelavsättningsvärdet motsvaras av 100 %. Värdet över 100 % anger överdosering och värdet under 100 % anger underdosering.



Figur 13.



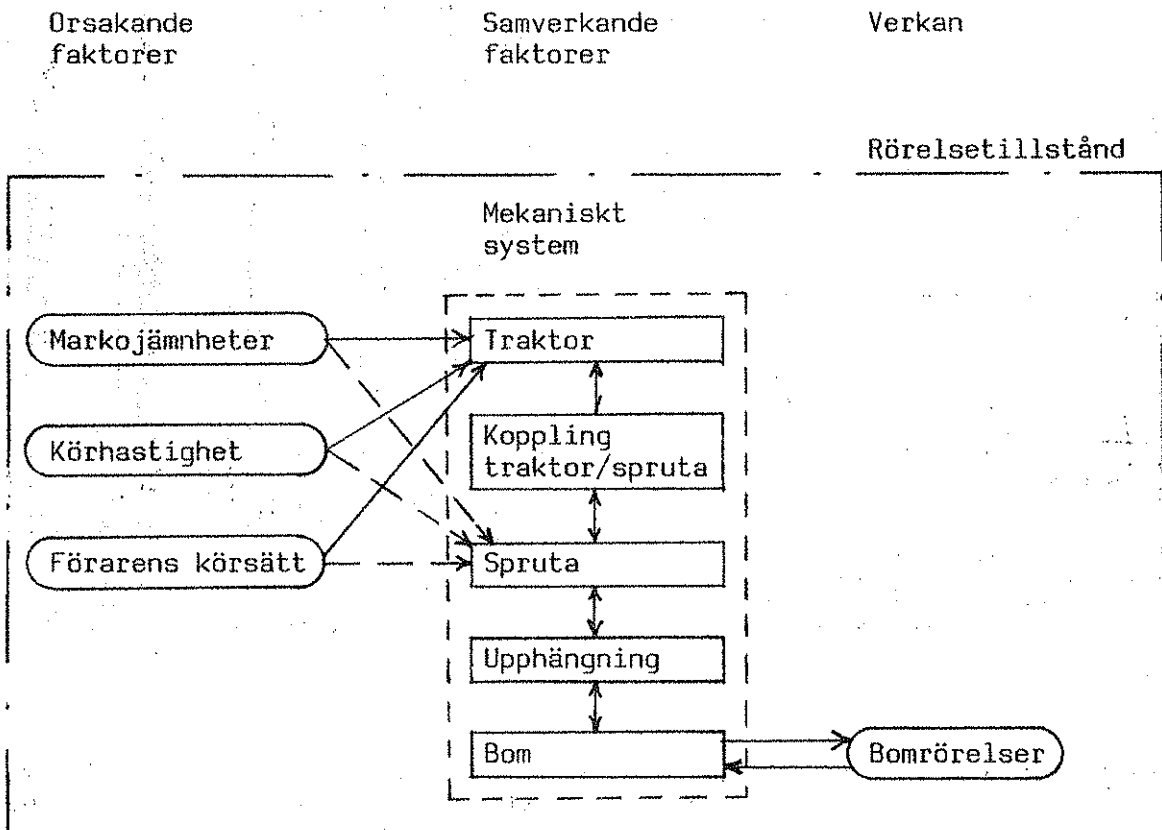
Figur 14.

Figur 13. Standardavvikelse från doseringsmedelvärdet (150 l/ha), mätt mellan och under spridarna. Bommen utsattes för vertikala respektive horisontala svängningsrörelser i förhållande till applikationsvagnen, vilken förflyttades med konstant hastighet (Ganzelmeier & Moser 1977). Standardabweichung = standardavvikelse. Düsen = spridare. Unter = under. Zwischen = mellan. Schwingweg-Amplitude = svängningsamplitud. Geschwindigkeits-Verhältnis = hastighetsförhållande.

Figur 14. Extremvärde för vätskeavsättningen i förhållande till doseringsmedelvärdet (150 l/ha). Bommen svängdes vertikalt respektive horisontalt i förhållande till applikationsvagnen, vilken förflyttades med konstant hastighet (Ganzelmeier & Moser 1977). Extremvärde des Spritzbelags bezogen auf den Belagsmittelwert = extremvärden för avsättningsmängden i förhållande till avsatt medelmängd. Övriga förklaringar - se figur 12 och 13.

## 5. SPRUTEKIPAGET - ETT MEKANISKT SYSTEM I RÖRELSETILLSTÅND

Med utgångspunkt i tillgänglig litteratur och praktiska erfarenheter kan följande sammanställning göras över de faktorer som orsakar eller påverkar sprutbommens rörelser under besprutningsarbetet (fig 15).



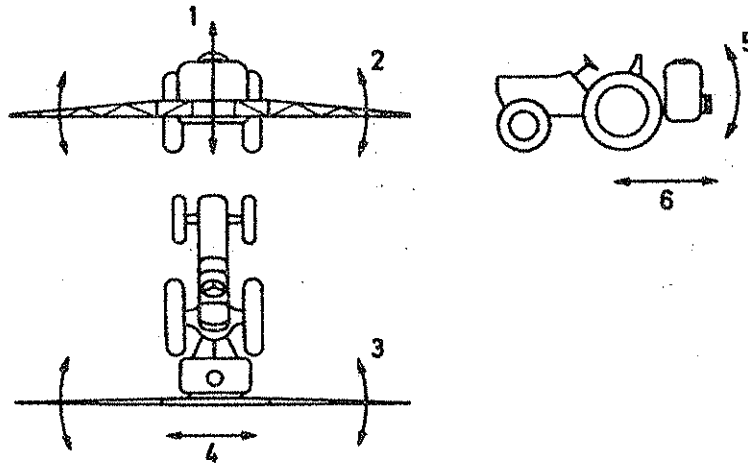
Figur 15. Faktorer som orsakar eller påverkar sprutbommens rörelser under besprutningsarbetet (egen sammanställning).

Enligt Schmidt-Ott (1976) befinner sig bommen i ett sprutekipage som körs över ett ojämnt fält i ett rörelsetillstånd med sex frihetsgrader. Förutom de tre translatoriska rörelserna, betecknade 1, 4, och 6 i figur 16, påverkas bommen av överlagrade rotationsrörelser kring sin tyngdpunkt, i tre geometriska plan. Dessa rörelser uppstår genom vridningar av ekipaget kring dess längd-, tvär- och vertikalaxlar och betecknas 2, 3 och 5 i figur 16. Vridningarna uppkommer dels genom att ekipagets hjul följer olika körspårsprofiler och del genom bommens egna tröghetskrafter och tröghetsmoment. Beträktalesättet förutsätter en idealt styv, stumt upphängd bom.

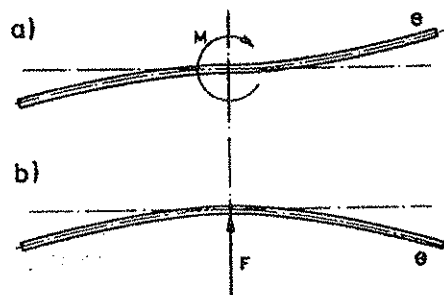
Utöver dessa rörelser tillkommer överlagringar av rörelser som förorsakas av den verkliga bommens elastiska deformationer i dess två längdplan. Av speciellt intresse är bommens primära egenfrekvenser för de två deformationstillstånd som visas i figur 17.

En ökning av bommens längd medför en ökning av bomändarnas lägesavvikelser.

Detta är särskilt påtagligt för vridningsrörelser kring ekipagets geometriska längd- och vertikalaxlar, här kallade rullnings- och girningsrörelser. En stunt upphängd bom deformerades enligt figur 17 a av dessa rörelser. Accelerationer av ekipaget i dess längd- och vertikalriktningar medför deformationer enligt figur 17 b.



Figur 16. Bomrörelsernas frihetsgrader (Schmidt-Ott 1976).



Figur 17. Elastiska deformationer av bommen (Schmidt-Ott 1976).

Nation (1978 b) har utöver dessa deformationer påvisat att torsionsvridningar av bommen kring dess längdaxel kan förekomma.

Nation & Holden (1976 a) bedömde att det förekom rörelseåterverkan från bommen till sprutan. Som stöd för detta anges förekomsten av nedåtriktade accelerationer i sprutans stativ, vilka var av storleksordningen två gånger tyngdaccelerationen.



## 5.1. Orsakande faktorer

### 5.1.1. Markojämnheter och körhastighet

Markytans ojämnheter på ett fält fördelar sig oftast oregelbundet och slumpmässigt, både beträffande storlek och avstånd. Under vissa förhållanden kan dock de dominerande höjdvariationerna förekomma med regelbundna avstånd och höjder t ex på en plöjd åker.

En betraktelse av ett hjul som följer en ojämn spårprofil visar att hjulet utsätts för ökade vertikala accelerationer om dess translationshastighet ökas. Härav följer att en ökning av ett sprutekipages körhastighet, på ett ojämnt fält, kommer att medföra att ekipaget tillförs störningar med större energiinnehåll, samtidigt som störningsfrekvensen ökar.

Begreppet spektral effekttäthet används i litteraturen (Speelman & Jansen 1974 och Ganzelmeier & Moser 1977) för att beskriva hur störningsenergin fördelas över störningarnas frekvensspektrum.

Enligt fysikens lagar beskrivs den harmoniska och dämpade svängningsrörelsens totala energi enligt:

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot w^2 \cdot A^2$$

Sätts uttrycket  $w = 2 \cdot \pi \cdot f$ , in i formeln erhåller man:

$$W = 2 \cdot m \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2$$

$W$  = total svängningsenergi (J)

$m$  = den svängande kroppens massa (kg)

$w$  = vinkelhastigheten kring oscillationscentrum (rad/s)

$A$  = amplituden (m)

$f$  = frekvens (rad/s)

Av formeln framgår att en halvering av frekvensen medför dubbelt så stor amplitud för oförändrad energimängd. Sambandet medför att även störningar med litet energiinnehåll ger upphov till stora amplituder, om frekvensen är låg.

Nordby (1979 b) menar att när sprutekipaget passerar över ojämnheter på ett fält kommer spruta och bom att sättas i rörelse. Jämn jordbearbetning och vältning bidrar därför till att reducera bomrörelsernas omfattning.

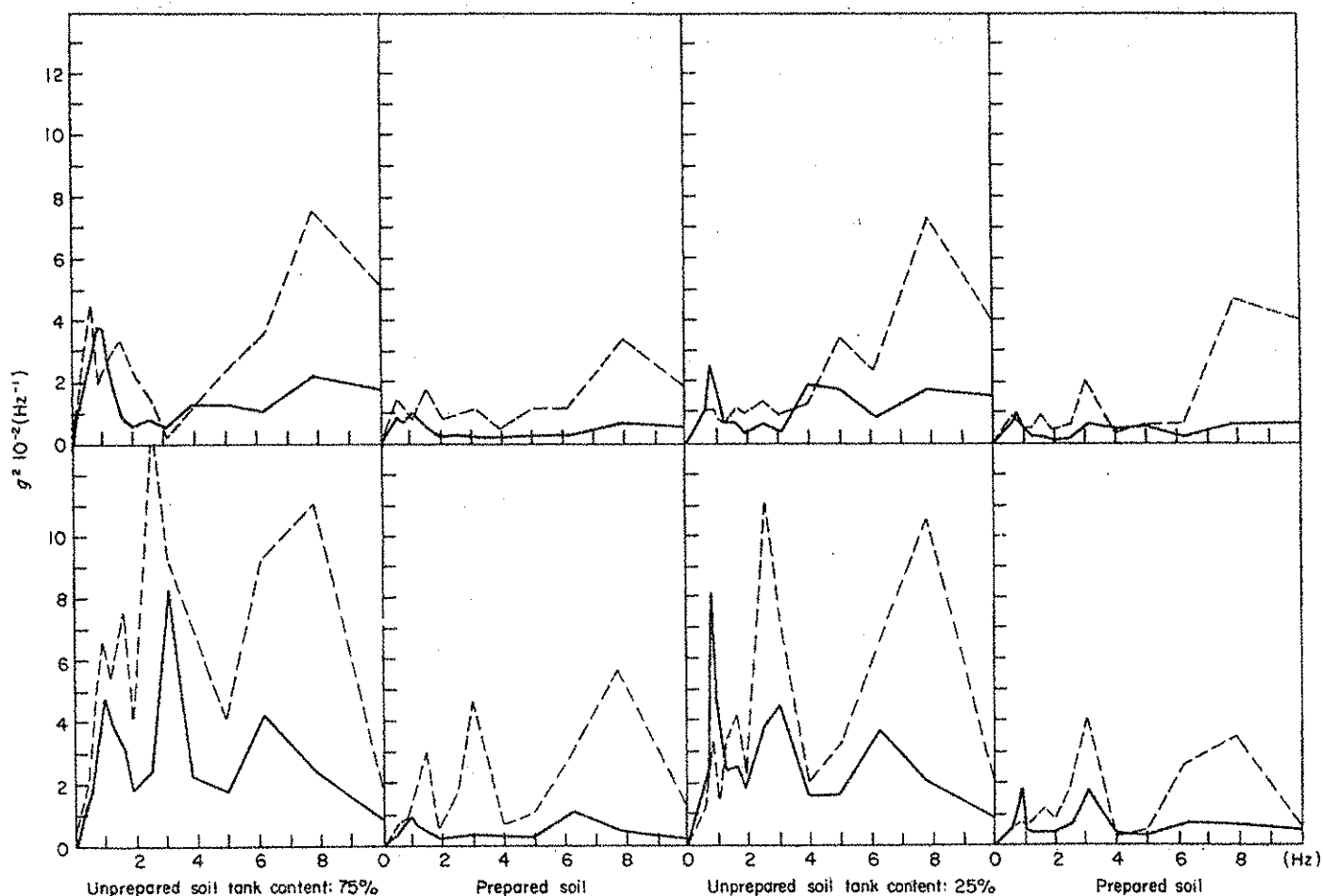
Schmidt-Ott (1976) visade i försök på en standardiserad försökskörbana att rörelsemönstret för ena änden på en styv försöksbom, stumt upphängd i en traktors trepunktskoppling, nära nog beskrev differensprofilen mellan de två körspårens profiler (fig 36). Differensprofilen framgår av figur 35.

Försöken visade även att bomändarnas lägesavvikelse ökade tilltagande med ökad körhastighet (fig 37 a). I ett fall med en pendelupphängd bom förekom dock att bomändarnas lägesavvikelse, i vertikal riktning, avtog med ökad körhastighet, efter att först ha uppnått ett maximivärde (fig 37 b).

I försök utförda av Speelman (1973) med olika sprutor, vilka hade olika bom-

upphängningar, framgick det att i tre av fyra försök ökade bomändarnas lägesavvikelser från det inställda höjdläget då hastigheten ökades från 4 km/h till 8 km/h. Ur försöksresultaten kan dessutom utläsas att bommens lägesavvikelser fördelades asymmetriskt, med en förskjutning uppåt av medelhöjdläget vid den högre hastigheten.

Den engelska fältförsöksserien med 14 sprutor (Nation & Holden 1976 a) bekräftar dessa resultat. Samband kan utläsas mellan ökade körhastigheter och ökade lägesavvikelser, i både vertikal och horisontal riktning. I försöken mättes accelerationspåkänningarna vid bomändarna med hjälp av accelerometrar och man konstaterade asymmetri i fördelningen av accelerationsvärdena i vertikal riktning. Denna ökade vanligtvis med ökad körhastighet. I horisontal riktning var accelerationsvärdena däremot nästan enbart normalfördelade.



Figur 18. Spektral effekttäthetsfunktioner för horisontala (övre) och vertikala bomrörelser (undre) av en 8 m lång bom vid 4,5 km/h (—) och 9,0 km/h (---) (Speelman & Jansen 1974). Unprepared soil = obearbetad plöjd mark. Tank content = Tankinnehåll. Prepared soil = såbäddsberedd mark.

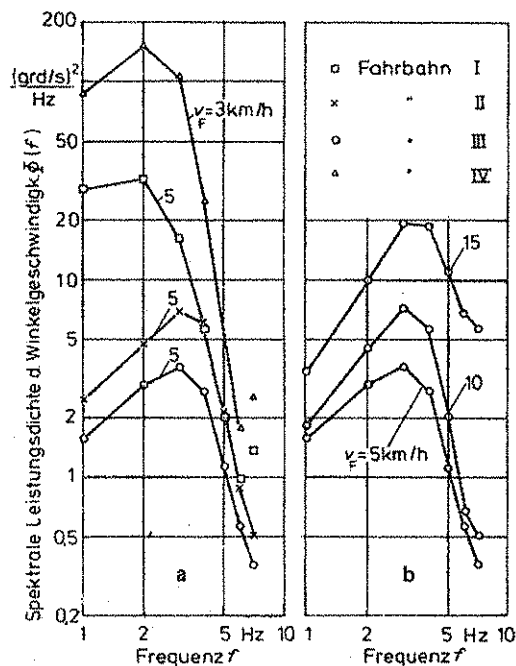
I fältförsök mätte Speelman & Jansen (1974) accelerationspåkänningar vid bomändarna på olika sprutor. Mätningarna gjordes i både vertikal och horisontal riktning med hjälp av accelerometrar. Försöken utfördes på olika underlag, dels på obearbetad plöjning och dels på såbäddsberedda delar av samma fält.

Dessutom studerades effekterna av olika fyllnadsmängder i sprutornas tankar, 25 % och 75 %, vid körhastigheterna 4,5 km/h och 9 km/h.

Resultaten presenterades i form av accelerationsvärden och spektral effekttäthetsanalys. I samtliga fall uppmättes lägre värden på den såbäddsberedda marken. Den högre körhastigheten medförde högre accelerations- och spektral effekttäthetsvärden (fig 18).

I liknande försök mätte Ganzelmeier & Moser (1977) vinkelhastigheterna i en traktors rullningsrörelser på olika underlag, vid olika körhastigheter. Även i dessa försök resulterade ökad körhastighet i ökad spektral effekttäthet (fig 19).

Försöken kördes på plöjd åker (I), ängsmark (II) och åkermark efter såbäddsberedning (III). Dessutom användes en definierad körbana (IV) som bestod av en slät betongbana, vilken hade försetts med 6 cm höga hinder tvärs körriktningen. Avstånden mellan hindren hade valts så att vridningsrörelser i alla tre riktningarna skulle uppstå hos ekipaget.



Figur 19. Spektral effekttäthet för vinkelhastigheten i traktorns rullningsrörelser (Ganzelmeier & Moser 1977).  
 a) På olika körunderlag vid konstant körhastighet.  
 b) På körunderlag III (såbäddsberedd åker) vid olika körhastigheter.  
 □ = plöjd åker                      o = såbäddsberedd åker  
 X = ängsmark                      Δ = försökskörbana

Figur 41 från samma undersökning visar bomändens standardavvikelse från inställt läge, som funktion av hastigheten för olika upphängningar.

I holländska försök (v d Weij et al 1972) där en traktor, med olika sprutor, kördes över ett hinder med höger fram- och bakhjul, konstaterades däremot

jämnare vätskefördelning vid ökad körhastighet. Detta förhållande konstaterades för såväl spaltspridare som virvelkammerspridare med fylld eller ihålig duschkon. För spaltspridarna minskade medelavvikelsen från 27,5 % till 19,6 % vid en ökning av hastigheten från 4 km/h till 8 km/h.

En undersökning utförd av Knott (1978) visade olika resultat som följd av ökad körhastighet, beroende på om bomkonstruktionen var styv eller vek. En vek bom försedd med spaltspridare uppvisade en jämnare fördelning vid en ökning av körhastigheten från 4 km/h till 8 km/h. Om bommen däremot var av styv konstruktion, försedd med spaltspridare och körhastigheten som ovan, försämrades fördelningsjämnheten - se punkt 5.2.4. figur 22 och 23.

I inomhusförsök med olika sprutor på en standardiserad körbana fann Porskamp (1981) att variationskoefficienten för vätskemängden, uppmätt under bommens ändar minskade med ökad hastighet.

### 5.1.2. Förarens körsätt

Schmidt-Ott (1976) fick vid försök med en pendelupphängd bom stor spridning av mätvärdena avseende en bomändes rörelser, trots att de enskilda försöken utfördes med identiska förutsättningar (se pkt 5.2.5. fig 37). Som rimlig orsak till dessa icke reproducerbara rörelsemönsters uppkomst angav han traktorförarens styrningsrörelser.

## 5.2. Samverkande faktorer

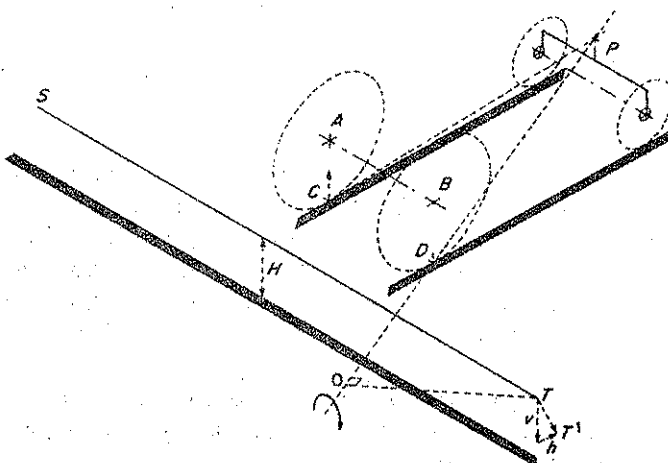
### 5.2.1. Traktorns konstruktion

Stor spårvidd och stor hjulbas medför att traktorn i mindre utsträckning påverkas av markens ojämnheter och därmed i mindre utsträckning utsätts för vridningsrörelser. Traktorns massa och dess geometriska konstruktion påverkar de tröghetskrafter och tröghetsmoment den uppvisar då den utsätts för olika kraftpåverkningar. Däcktyp, däckdimension och ringtryck påverkar hjulens fjädrande och dämpande egenskaper. Glapp i traktorns styrsystem påverkar dess förmåga att följa en rak kurs.

Nation (1982 a) åskådliggjorde i en schematisk bild hur traktorn på grund av sin geometriska konstruktion påverkar ena bomändens läge då dess ena bakhjul passerar ett hinder (fig 20).

Linjen ST föreställer bommen inställd på en nominell höjd  $H$  över marken. Traktorns båda bakhjul A och B står på marken i punkterna C och D och dess framaxelpivå finns i punkten P. Om hjul A tvingas upp, i förhållande till punkt D, på en puckel i punkt C, kommer traktorn att vridas kring linjen PD. Detta medför att bomänden i punkten T kommer att utföra en roterande rörelse kring punkten O på linjen PD, till den nya positionen  $T^1$ . Denna förflyttning medför att bomänden förflyttas komponenten  $v$  i vertikal riktning och komponenten  $h$  i horisontal riktning.

Schmidt-Ott (1976) fann vid försök på en standardiserad försökskörbana med en stumt upphängd styv försöksbom, att dess lägesavvikelser ökade tilltagande för ökad körhastighet. Detta förhållande menade han bero på elastiska deformationer av bommen och dess upphängningsanordning - se punkt 5.2.5. fig 37 a.



Figur 20. Ena bomändens rörelse kring en rät linje mellan traktorns framaxelpivå och ena bakhjulets understödspunkt (Nation 1982 a).

Copyright: The British Society for Research in Agricultural Engineering.

Återges med tillstånd via H.J. Nation, NIAE.

### 5.2.2. Kopplingssystem traktor/spruta

Glapp och spel i kopplingsanordningen mellan traktor och spruta medför att traktorn i vissa riktningar kan utföra mindre rörelser utan att påverka sprutans rörelser. Däremot kan traktorns större rörelser omvandlas till slag i kopplingsanordningen. Mot dessa slag ställs de tröghetskrafter och tröghetsmoment som traktor respektive spruta kan uppvisa. Även friktion och dämpning i kopplingsanordningen påverkar överföringen av kraftpåkänningar. Detta gäller isynnerhet för en burens spruta.

Nordby (1979 b) menade att det är viktigt att dragstängerna spärras i sidled vid användning av en burens spruta, så att denna inte kan kastas från sida till sida. Det får dessutom inte vara glapp i kulfästena.

### 5.2.3. Sprutans konstruktion

Sprutans massa och dess geometriska konstruktion avgör med vilka tröghetskrafter och tröghetsmoment den ställer upp mot olika kraftpåverkningar då dess tank är tom. Med helt fylld tank kommer sprutan att uppvisa större tröghetskrafter och tröghetsmoment. Med delvis fylld tank kommer vätskans förflyttningar att bidra med både dämpande och störande verkningar på ett slumpartat sätt.

Speciellt för en bogserad spruta gäller att den liksom traktorn är beroende av sina konstruktionsmått beträffande de störningar som direkt orsakas av markens ojämnheter. Stor spårvidd, och i viss mån stort avstånd mellan dragögla och hjulupphängning, minskar verkningarna av dessa ojämnheter. Dessutom kan hjulupphängningens konstruktion ha en dämpande och utjämnande verkan. En boggi, eventuellt med fjädring och dämpning, bidrar till reducering av markojämnheters verkan. Hjulstorlek, däcktyp och ringtryck inverkar också.

Ur resultaten från fältförsöksserien med 14 sprutor (Nation & Holden 1976 a) kan utläsas att det oftare förekom större standardavvikelser för accelerationsvärdena uppmätta vid bomändarna, i både vertikal och horisontal riktning, för försök utförda med tom tank än för försök med full tank. Detta gällde även för rent vertikala accelerationsvärden uppmätta vid sprutans bomstativ.

I försöksserien prövades även antagandet att bogserade sprutor i mindre utsträckning än burna utsattes för girningsrörelser och därmed skulle uppvisa lägre horisontala accelerationsvärden vid bomändarna. Någon sådan korrelation kunde dock inte konstateras

#### 5.2.4. Bommens konstruktion

Bommens uppgift är att bära upp spridare och spridarledningar på ett sådant sätt att spridarna kan föras fram över marken eller växterna i önskat höjdläge med konstant hastighet.

Via sin upphängning utsätts bommen för dynamiska belastningar mot vilka den ställer upp tröghetskrafter och tröghetsmoment. Gör man antagandet att en stumt upphängd bom utgörs av en idealt styv konstruktion, eller att den utsätts för vridmoment som ger upphov till konstant vinkelacceleration kring någon av dess tvärxlar, gäller momentekvationen:

$$M = \alpha \cdot J$$

M = moment (Nm)

$\alpha$  = vinkelacceleration (rad/s<sup>2</sup>)

J = tröghetsmoment (kgm<sup>2</sup>)

För en sådan bom med jämnt fördelad massa över hela sin längd, gäller att:

$$J = \frac{m \cdot L^2}{12} = \frac{q \cdot L^3}{12}$$

m = bommens massa (kg)

L = bommens längd (m)

q = m/L = masskoncentrationen i bommen (kg/m)

Härav följer, under dessa förutsättningar, att bommens tröghetsmoment är proportionellt mot kubiken av dess längd (L<sup>3</sup>). Detta ger att en ökning av bommens längd kommer att medföra mycket kraftiga belastningsökningar. För att klara dessa måste bomkonstruktionen kraftigt förstärkas, vilket medför en ökning av dess massa. I sin tur leder detta till ytterligare belastningsökningar.

Reduceras masskoncentrationen  $q_x$  kontinuerligt i bommens konstruktion, så att  $q_x$  i dess ändar =  $q_0/2$ , enligt:

$$q_x = q_0 \left(1 - \frac{x}{2s}\right)$$

För den utbredda last, som verkar på en bomhalva, kan en resulterande kraft  $F$  beräknas enligt:

$$F = P \cdot s$$

Eftersom bommen har förutsatts ha jämnt fördelad massa, kommer dess totala massa  $m$  att vara proportionell mot dess längd  $L$ , vilket ger:

$$m_h = q \cdot s$$

$q$  = masskoncentrationen i bommen (kg/m)

Uttrycket för svängningsrörelsens frekvens kan nu skrivas enligt följande:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c \cdot EI}{q \cdot s^4}}$$

Härav följer att bommens egenfrekvens är proportionell mot:

- $\sqrt{c \cdot EI}$  ; för konstant masskoncentration och längd.
- $\frac{1}{s^2}$  ; för konstant masskoncentration och böjstyvhet.
- $\frac{1}{\sqrt{q}}$  ; för konstant längd och böjstyvhet.

Egna utsvängningsförsök med olika stålstänger bekräftar egenfrekvensen längdberoende enligt ovan.

Från transport- och förvaringssynpunkter måste bommen kunna fällas samman så att sprutans utrymmesbehov blir så litet so möjligt. Bommen är oftast uppdelad i ett antal sektioner vilka är förbundna med varandra via leder. Större bommar fälls vanligen ihop med hjälp av hydraulik. Lederna till de yttre sektionerna är oftast försedda med en utlösningsskoppling, så att yttersektionerna kan vika undan vid påkörning av fasta hinder. Denna utlösningsskoppling är vanligtvis konstruerad så att den yttre sektionen själv återgår till sitt läge efter en påkörning. Detta kan ske med hjälp av tyngdkraften eller fjäderkrafter

Hagenvall (1978) genomförde under 1977 en konditionsundersökning av 83 lantbrukssprutor som hade gått i praktisk drift. I rapporten anges under rubriken "Sprutförarnas egna förslag till tekniska förbättringar", bommens konstruktion och hållbarhet som ett ständigt återkommande problem. Många sprutförare ansåg konstruktionerna vara för veka.

Schmidt-Ott (1976) hävdade att i praktiken väljs bommens yttröghetsmoment (böjstyvhet) oftast tillräckligt stort i vertikal riktning, medan det i horisontal riktning är otillräckligt. Principiellt ska de båda yttröghetsmomenten inte skilja sig från varandra och vara så stora att bommen inte synbart böjs på grund av sin egenvikt. Genom att utföra bommens upphängning på ett sådant sätt att den långtgående reducerar förekommande krafter och moment erhålls bl a fördelen att bommen kan utföras mindre kraftigt dimensionerad.

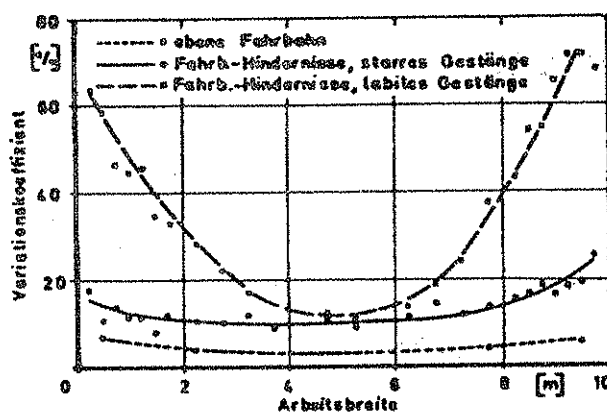
Även Nation (1980) menade att många bommar i praktiken är mindre böjstyva i horisontal än vertikal riktning.

Knott (1978) genomförde försök i en försökshall med, en i marknaden förekommande, traktorburn spruta med 10 m arbetsbredd och 400 l tankvolym. I sitt normalutförande var sprutbommen strävad med stag i horisontal riktning, vilket medförde god stabilitet i denna riktning. En kraftansättning med 5 kp, i horisontal riktning i bommens ena ände, medförde ett 15 cm stort utslag. Togs staget bort ökade utslaget till ca 50 cm. Knott kommenterade att detta tillstånd motsvarar de i praktiken vanligast förekommande förhållandena.

Bommen var vid försöken utrustad med spaltspridare ( $120^\circ$ ) respektive virvelkammarspridare. Försöken kördes på betonggolv med körhastigheterna 4 km/h och 8 km/h. Körsträckan var försedd med ett hinder vilket skulle efterlikna ett traktorspår, dock med skillnaden att spårets profil i det här fallet var positiv. Det utgjordes av två 40 mm tjocka träplankor tvärs körriktningen. Då traktorn passerade hindret uppstod stötimpulser som påverkade ekipagets rörelsebeteende. Sprutvätskan fångades upp på mätobjekt och mängdbestämningen gjordes med en fluorimetrisk metod.

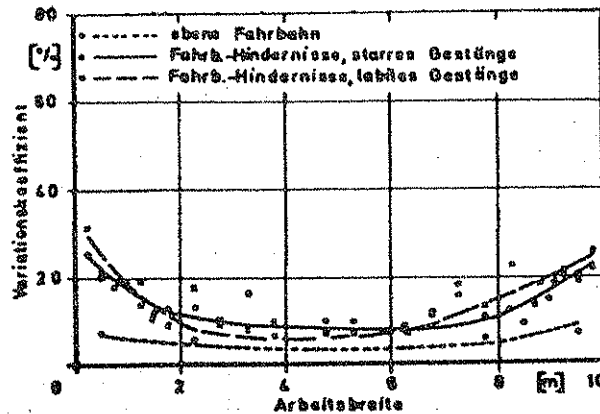
Resultaten i form av variande vätskefördelning för olika bomstyvhetsutföranden vid olika hastigheter och bommen försedd med spaltspridare kan utläsas vid jämförelser i och mellan figurerna 22 och 23. Största variationskoefficienten vk erhöles på en hinderförsedd körsträcka vid 4 km/h då bommen inte var strävad. Minsta vk erhöles på en körsträcka utan hinder. Försöken visade att vk minskade med ökad hastighet då bommen inte var strävad. Detta förhållande förklarade Knott med att störningsfrekvensen ökade vid ökad körhastighet i förhållande till bommens relativt låga egenfrekvens. En antydning till ökad vk kan där emot utläsas för ökad köhastighet då bommen var strävad.

De försök som utfördes med bommen försedd med virvelkammarspridare visade motsvarande resultat, dock med skillnaden att betydligt lägre vk-värden erhöles. Figurerna från dessa försök återges inte i detta arbete.



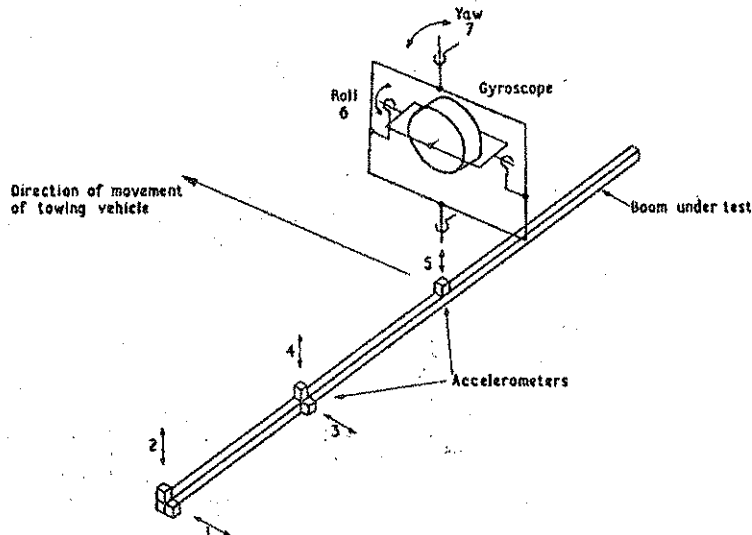
Figur 22. Fördelning av sprutvätska över en 3 m lång mätsträcka uppdelad i 50 mm långa avsnitt. Buren spruta, 10 m arbetsbredd och spaltspridare  $120^\circ$ . Körhastighet = 4 km/h (Knott 1978). Ebene Fahrbahn = jämn körbanan. Hindernisse = hinder. Starres = strävad. Gestänge = bom. Labiles = osträvad.





Figur 23. Fördelning av sprutvätska över en 3 m lång mätsträcka uppdelad i 50 mm långa avsnitt. Buren spruta, 10 m arbetsbredd och spaltspredare 120°. Körhastighet = 8 km/h (Knott 1978). Förklaringar - se figur 22.

I fältförsöksserien med 14 sprutor (Nation & Holden 1976 a,b och Nation 1982 a) undersöktes även sambandet mellan bomändarnas rörelser och sprutans rörelser, vilka bestod av dess rullnings-, girnings- samt rent vertikala rörelser. Dessutom gjordes mätningar av den yttre bomledens rörelser. Beroende av bommens konstruktion gjordes mätningarna i antingen vertikal eller horisontal riktning. Bommens rörelser och sprutans vertikala rörelser mättes med hjälp av accelerometrar. Sprutans vridningsrörelser mättes med hjälp av ett gyroskop (fig 24).



Figur 24. Schematisk bild över försöksutrustning för mätning av bommens och sprutans rörelser (stencil NIAE). Direction of movement of towing vehicle = sprutekipagets körriktning. Roll = rullningsrörelse. Yaw = girningsrörelse.

Ledernas avvikelser beräknades i förhållande till en rak linje mellan bommens

mittpunkt och dess ena ände. Med utgångspunkt i sprutans rullnings- och girningsrörelser, samt dess rent vertikala rörelser, gjordes beräkningar av bomändarnas rörelser. Med linjär regression påvisades starka samband mellan ledernas avvikelser och bomändarnas lägesavvikelser, dvs bommen utsattes för antingen böjning eller vikning. Detta gällde i både vertikal och horisontal riktning.

De vertikala accelerationsvärdena vid bomändarna visade sig vara asymmetriskt fördelade med uppåtriktade maxima ofta 50-100 % större än nedåtriktade. Nation antog att de höga uppåtriktade accelerationerna uppstod då en fallande bom abrupt bromsades upp av kedjor, vajrar eller stag. Sådan asymmetri var vanligen mindre markant för bommar av konsolkonstruktion. I horisontal riktning visade sig accelerationsvärdena vara mer normalfördelade. Låga maxivärden och smala spridningsbilder av värdena återfanns hos sprutor där bommens yttersektioner hölls i läge av tyngdkraften.

Nation kom till slutsatserna att bommen ska bestå av en styv konsolkonstruktion med glappfria leder och att utlösningssanordningen ska ha en distinkt lägeshållning. Användning av vajrar och kedjor för lägeshållning ska undvikas.

Enligt Cowling (1980) utsätts bommarna för störst påkänningar vid sina leder. Det är också här den övervägande delen brott sker.

Nation (1978 a) menade att sannolikheten för att sprutekipagets understödssyta ska vara representativ för marknivån vid bomändarna minskar vid ökade arbetsbredder. Han föreslog att en möjlig lösning på problemet kan vara att göra bommen ledad så att den kan vinklas i vertikal riktning.

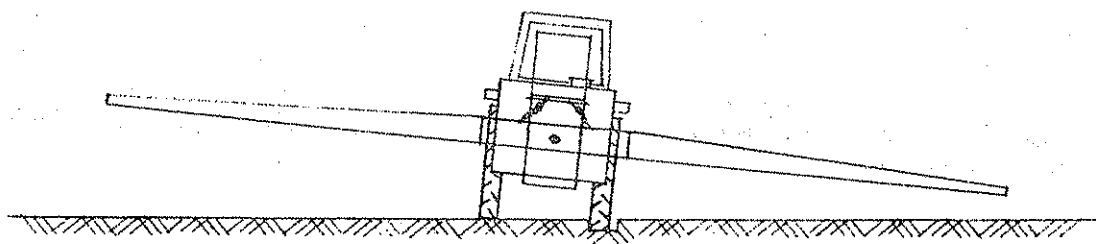
### 5.2.5. Upphängningens konstruktion

Målet för upphängningens funktion är att bommen skall bäras upp på ett sådant sätt att samtliga dess spridare kan föras fram över marken eller växterna i önskat höjdläge och med inbördes lika hastighet i förhållande till denna eller dessa. Härigenom minskas riskerna för ojämn fördelning av sprutvätskan. Kravet på jämn vätskefördelning gör det därför väsentligt att bommen i så liten utsträckning som möjligt avviker från sitt avsedda arbetsläge.

Genom olika utföranden av upphängningssanordningen ges i denna, i varierande grad, möjligheter till antingen isolering från sprutans störande rörelser eller med tillsats av ett regleringssystem, kompensering av dessa rörelser. Förutsättningen är dock att upphängningen medger rörelsefrihet mellan spruta och bom (Schmidt-Ott 1976). Detta gäller främst rörelseformerna 2 och 3, men även 1 och möjligen 6 (fig 16). I styr- och reglertekniksammanhang benämns metoderna "passiv" respektive "aktiv dämpning". En kombination av båda metoderna är fullt möjlig.

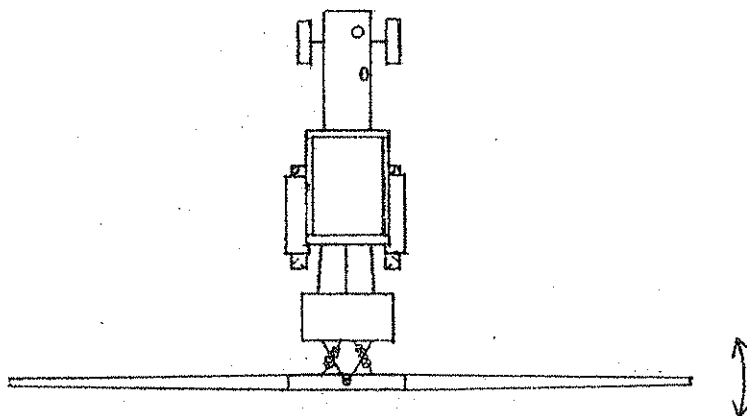
Förutsättningen för kontinuerlig lägeshållning av bommen är att det finns ett referenssystem, till vilket bommens läge är bestämt alternativt kan bestämmas. I vertikal riktning utgörs referensstorheten av bommens avstånd (skalär) till marken eller växterna. I horisontal riktning utgörs bommens medelhastighet referensstorhet (vektor) (Schmidt-Ott 1976).

Schmidt-Ott (1976) hävdade med utgångspunkt från sina försök med olika upphängningar att en stum infästning av bommen är tillräddig endast för mindre arbetsbredder upp till ca 10 m. Göhlich (1968) ansåg att denna gräns går vid



Figur 29. En pivåupphängd bom, vars jämviktsläge är relaterat till sprutans stativ, intar ett läge skilt från sitt korrekta arbetsläge då sprutekipaget körs i långsträckta ojämnheter (egen fig).

För bommens horisontala lägesavvikelser, som uppstår genom svängningsrörelser enligt rörelseform 3 (fig 16), kan en anpassning till sprutekipagets hastighet ersättas med en anpassning till ett jämviktsläge i ett dämpat svängningssystem, vilket relateras till sprutekipagets körriktning. Genom att lagra bommen kring en vertikal pivå och förse upphängningen med ett fjäder-/dämparearrangemang kan detta system skapas (fig 30).



Figur 30. Bommen lagras kring en vertikal pivå. Horisontal lägeshållning sker med ett fjäder-/dämparearrangemang i förhållande till sprutans stativ (egen figur).

I de fall lantbrukssprutorna i praktiken har försetts med utrustning för förbättrad lägeshållning, sker denna nästan uteslutande vertikalt. Oftast sker då styrningen av bommen i horisontal riktning med hjälp av vertikalt stående gejdrar, mellan vilka den tillåts utföra vertikala svängningsrörelser.

I sin avhandling undersökte Schmidt-Ott (1976) olika pendelupphängningars svar på väl definierade störningar. Försök utfördes dels under laboratoriemässiga förhållanden med en svängningssimulator, dels under praktiskt snarlika förhållanden på en standardiserad försökskörbana.

Enligt Schmidt-Ott kan det passivt dämpade svängningssystemet liknas vid en signalförstärkare med omvänd förstärkningsfunktion. Syftet är att förhållandet mellan ut- och insignalernas amplituder skall anta värdet 0 oberoende av

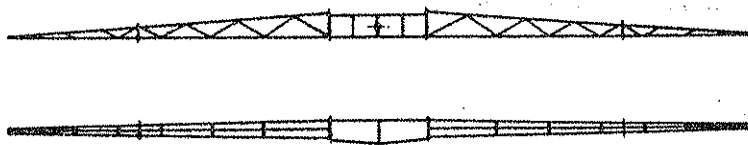
insignalernas frekvens- och amplitudvärden. Avgörande för det passivt dämpade systemet är dess egenfrekvens. Ju mer störsignalernas frekvens närmas denna desto mer kommer förstärkningsfunktionens värde att avvika från värdet 0.

För sinusformade ingångssignaler kan förstärkningsfunktionen beskrivas med en s k frekvenskurva. Denna kan delas upp i amplitud- respektive faskurva. För jämnast möjliga vätskefördelning saknar en faskförskjutning av bommens rörelser, i förhållande till insignalerna, betydelse.

För linjära förstärkningsfunktioner är frekvenskurvan definierad så att utgångsfrekvensen motsvaras av ingångsfrekvensen och utgångsamplituden beror av ingångsamplituden. Passivt dämpade upphängningar uppvisar icke linjära förstärkningsfunktioner på grund av inverkan av friktionskrafter. Dessa friktionskrafter påverkar systemets återförande krafter så att de inte linjärt motsvarar bommens utslag från jämviktsläget. Förhållandet mellan utgångsamplitud och ingångsamplitud, för olika störfrekvenser, möjliggör dock jämförelser mellan olika upphängningskonstruktioner.

Simulatorn konstruerades så att man med denna skulle kunna simulera de vertikala rörelser som uppstår i en traktors trepunktskoppling på grund av att dess hjul följer olika spårprofiler. Den hade även konstruerats så att ett minimum av horisontala krafter skulle uppstå. I simulatorn kunde en ren vridningsrörelse av upphängningarna åstadkommas. Samtidigt som ena sidan utsattes för en harmonisk rörelse med positivt tecken, kunde andra sidan utsättas för samma rörelse, men av motsatt tecken. Jämförande försök utfördes med olika upphängningar i området för respektive konstruktioners egenfrekvens.

För försöken byggdes en särskild försöksbom med hög böjstyvhet i både vertikal och horisontal riktning (fig 31). Härigenom skulle inflytandet på mätvärdena av dess elastiska deformationer hållas så lågt som möjligt. Av samma anledning byggdes bommen utan leder. Den här bommen användes sedan genomgående i samtliga försök. Detta var möjligt eftersom den kunde förses med olika upphängningsdetaljer, t ex olika långa pendelarmar.

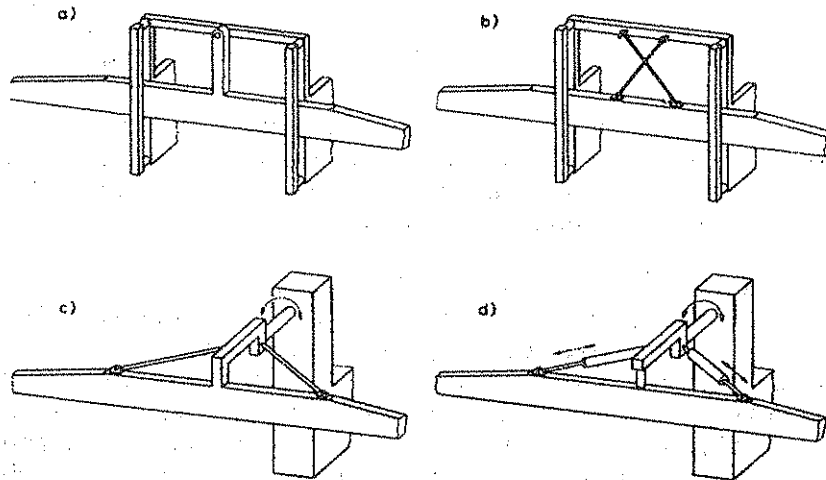


Figur 31. Försöksbom (Schmidt-Ott 1976). Längd = 14 m, vikt = 75 kg och tröghetsmoment  $\approx 800 \text{ Nms}^2$ .

För försöken byggdes även ett antal upphängningar av olika grundtyper (fig 32). Dessa konstruerades efter i praktiken förekommande konstruktioner eller eljest tänkbar lösning.

#### 1. Den styrda pendeln (fig 32 a).

Konstruktionen kännetecknades av att bommen var försedd med en pendelarm, vari den ledat hängts upp. I det vertikala planet, tvärs den tänkta körriktningen, styrdes bommen mellan gejdtrar. Försökskonstruktionen medgav steglös ändring av pendellängden.

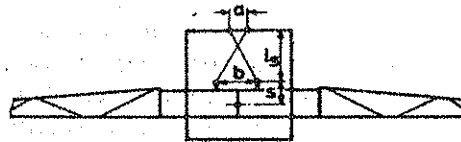


Figur 32. Upphängningar av olika grundmodeller (Schmidt-Ott 1976).

- a) Styrd pendel                      b) Styrd vajerpendel  
c) Strävad pendel                    d) Fri pendel

## 2. Den styrda vajerpendeln (fig 32 b).

Pendelarmen hade ersatts med två korsande vajrar. I figur 33 visas konstruktionens viktigaste mått.



Figur 33. Vajerpendelns mått (Schmidt-Ott 1976).

## 3. Den strävade pendeln (fig 32 c).

Konstruktionen kännetecknades av en kraftigt lagrad pendelaxel, utförd att kunna ta upp moment i sin axiella riktning. Dessa moment överfördes av försträvningarna mellan bom och pendellagring. Härigenom gjordes de vertikala gejderna överflödiga.

## 4. Den fria pendeln (fig 32 d).

Bommen var rörligt upphängd i både vertikal och horisontal riktning. Återföringen till dess horisontala neutralläge tvärs körriktninge skedde med hjälp av en fjäder-/dämparkombination. Dessa element utgjorde en del av själva pendeln (pendelarm och bom), i avsikt att begränsa störande inverkan från bommens horisontala rörelser på dess vertikala lägeshållning.

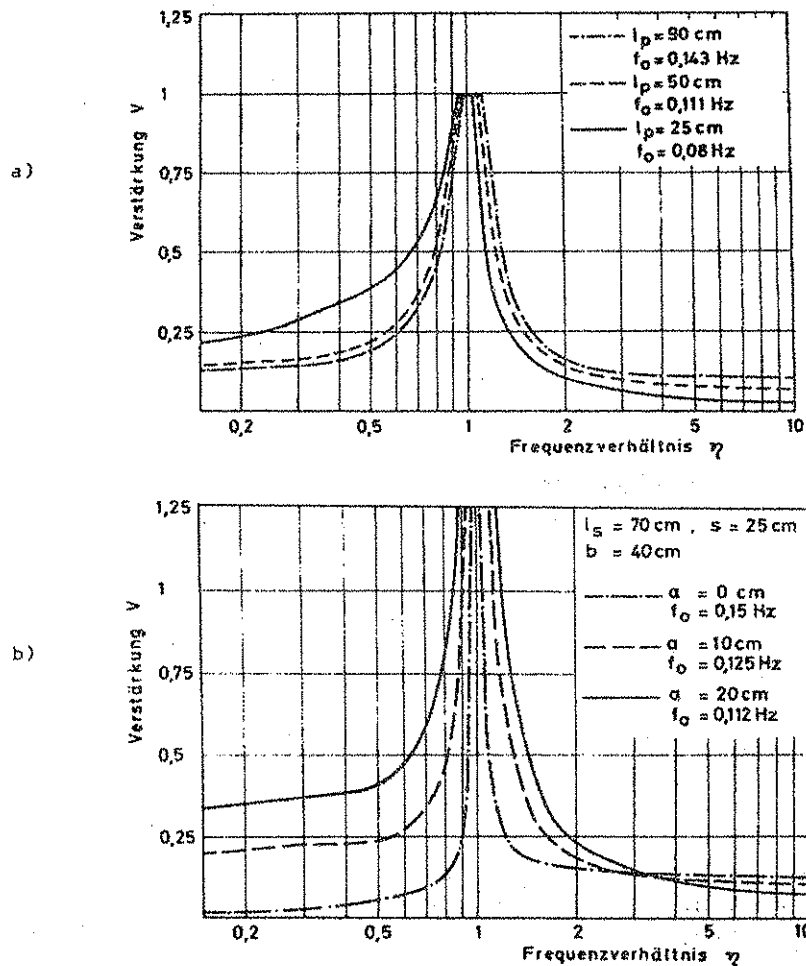
I simulatören utsattes upphängningarna enligt figur 32 a, b och c för störningar med konstant amplitud. Dessa störningar skulle motsvara de avvikelser som uppkommer, med en stumt upphängd bom, då traktorns bakhjul passerar en

höjdskillnad av 10 cm. Med 1,5 m spårvidd och 14 lång bom blev utslaget vid bomändarna ungefär  $\pm 0,5$  m.

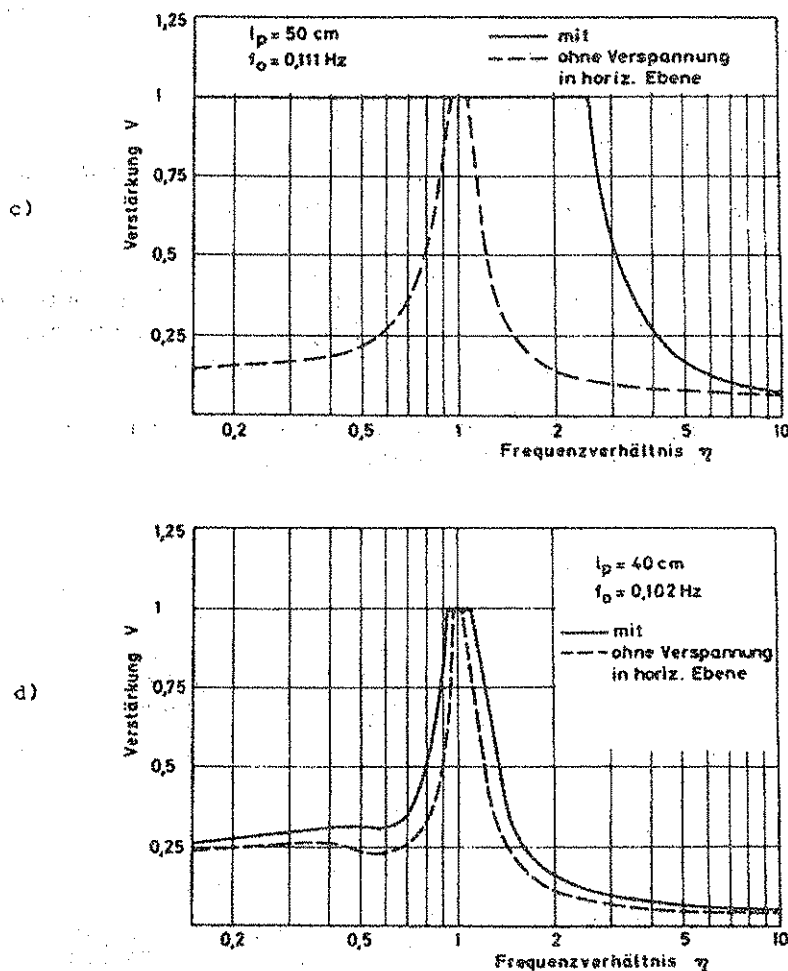
Först bestämdes upphängningarnas egenfrekvenser genom utsvängningsförsök. Tidsåtgången för ett antal hela svängningsperioder mättes och dividerades med antalet perioder. Amplitud- och fasförhållandena bestämdes genom mätning av resulterande utgångsamplituder och tidsförskjutningar.

I området under egenfrekvensen blev bestämningen av fasvinkeln osäker eller omöjlig att genomföra på grund av icke linjär förstärkning. Amplituderna kunde däremot bestämmas. I området för upphängningarnas egenfrekvenser förekom amplitudkurvor som saknade entydiga svängningsmaxima.

I figur 34 visas de resulterande förstärkningskurvorna som funktioner av förhållandet mellan störfrekvens och egenfrekvens.



Figur 34 a och b. Förstärkningsfunktioner för upphängningarna enligt fig 32 (Schmidt-Ott 1976). Verstärkning = förstärkning. Frequenzverhältnis = frekvensförhållande. Mit = med. Ohne Verspannung in horiz. ebene = utan horisontal belastning.  $l_p$  = pendellängd.  $f_0$  = pendelns (bommens) egenfrekvens.



Figur 34 c och d. Förstärkningsfunktioner för upphängningarna enligt fig. 32 (Schmidt-Ott 1976). Förklaringar - se fig 34 a och b.

Figur 34 a visar resultatet av olika pendellängder för den styrda pendeln. I egenfrekvensområdet uppstod fasthäftning mellan bom och upphängning. Detta medförde att förstärkningsfaktorn inte översteg värdet 1,0.

För störfrekvenser under egenfrekvensen ökade bommens lägesavvikelse med minskad pendellängd. Detta menade Schmidt-Ott bero på den återförande kraftens (momentets) minskning i förhållande till förekommande friktionskrafter.

I området över egenfrekvensen minskade däremot lägesavvikelseerna med minskad pendellängd. Förklaringen ansågs vara att bommen, genom minskad pendellängd, utsattes för minskade moment. Dessa moment uppstod på grund av upphängningspunktens förflyttningar i sidled och bommens tröghet. En ökning av störfrekvens medförde att upphängningspunkten utsattes för större accelerationer, eftersom störningsamplituden hölls konstant.

Utifrån dessa resultat drog Schmidt-Ott slutsatsen att det existerar en optimal pendellängd, som beror av bommens massa och geometri.

Den styrda vajerpendeln (fig 32 b) utförde, i området under egenfrekvensen,

svängningar i motfas vars amplituder ökade med avståndet  $a$  mellan vajrarnas övre fästpunkter (fig 33). I egenfrekvensområdet uppstod resonanssvängningar med  $180^\circ$  förskjutning, för vilka förstärkningsfaktorn översteg värdet 1,0. Dessa stora amplituder berodde på att det inte kunde uppstå fasthäftning och att glidfriktionen var för svag för att dämpa dessa svängningar.

Schmidt-Ott påpekade att upphängningarnas utmärkta filtreringsförmåga måste betraktas med hänsyn tagen till simulatorns ideala förhållanden. Genom en laboratoriemässig ensidig belastning av bommens ena ände, med en horisontal kraft på 100 N, ökades friktionskrafterna mot gejderna hos den styrda pendeln. Härigenom ökades betydligt deras negativa inverkan på förstärkningsfunktionen. Fasthäftning mellan bom och upphängning förekom nu även långt över egenfrekvensen (fig 34).

Samma försök med den strävade pendeln (fig 32 c), i vars lagring de horisontala krafterna upptas, gav betydligt bättre resultat. Figur 32 d visar att upphängningens filtreringsfunktion inte gick förlorad trots den ökade belastningen på upphängningslagringen.

Schmidt-Ott gjorde antagandet att sprutekipagets rullnings- och girningsrörelser påverkar bommen med störningar i slumpartad följd och att dess girningsrörelser dessutom påverkar bommens vertikala rörelser under varierande friktionsförhållanden. Man antog vidare att en upphängningskonstruktion som medför att de horisontala normalkrafterna reduceras bör leda till förbättrad stabilitet av bommen. Detta ledde till att man under försökens gång konstruerade den fria pendeln (fig 32 d).

Försök med horisontal statisk belastning av den fria pendeln var inte möjligt att genomföra, men Schmidt-Ott hävdade att den fria pendelns känslighet för ökade horisontala belastningar torde motsvaras av resultaten för den strävade pendeln (fig 34 d).

Genom simulatorns konstruktion och funktionssätt hade förekomsten av horisontala krafter väsentligen kunnat reduceras. Detta medförde att den inte kunde användas för praktiskt rättvisande bedömningar av upphängningarna. Man avstod därför från försök med stokastiska störningar.

I avsikt att åstadkomma praktiskt snarlika försöksbetingelser utfördes därför försök på en standardiserad körbana. Dessa försök kördes med en traktor på ett 10 m långt avsnitt av en körbana enligt den engelska normen BS 4220 (fig 35). Upphängningarna kopplades direkt till traktorns trepunktskoppling. Samma bom användes som i tidigare simulatorförsök. Traktorns bakhjulsspårvidd var 1,5 m.

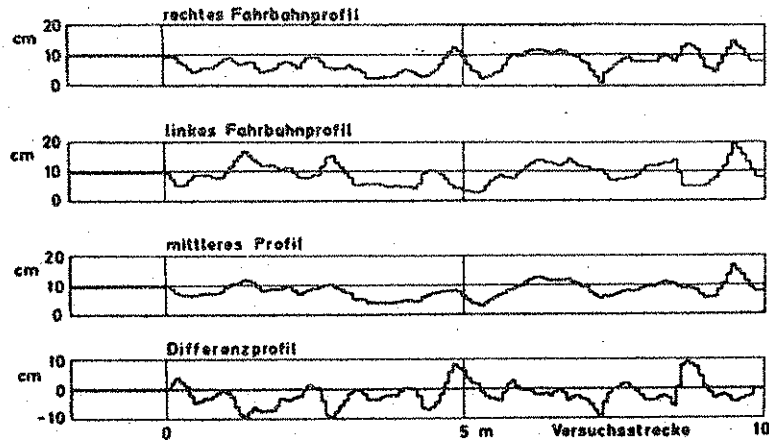
Bommens rörelser mättes i horisontal riktning med en accelerometer. I vertikal riktning bestämdes bommens höjdlägen med mekanisk avkänning och induktiv mätning.

Enligt Schmidt-Ott kunde störningarnas frekvenser påverkas av körhastigheten, medan amplituderna huvudsakligen berodde av körbanans profil. De erhållna resultaten ansågs därför vara specifika för den använda körbanan. Men eftersom körbanans profil framkallade slumpmässiga rörelser, dvs ojämnheter upprepades ej periodiskt, ansågs tendenserna i resultaten vara tillämpliga även för andra körunderlag med slumpmässig profil.

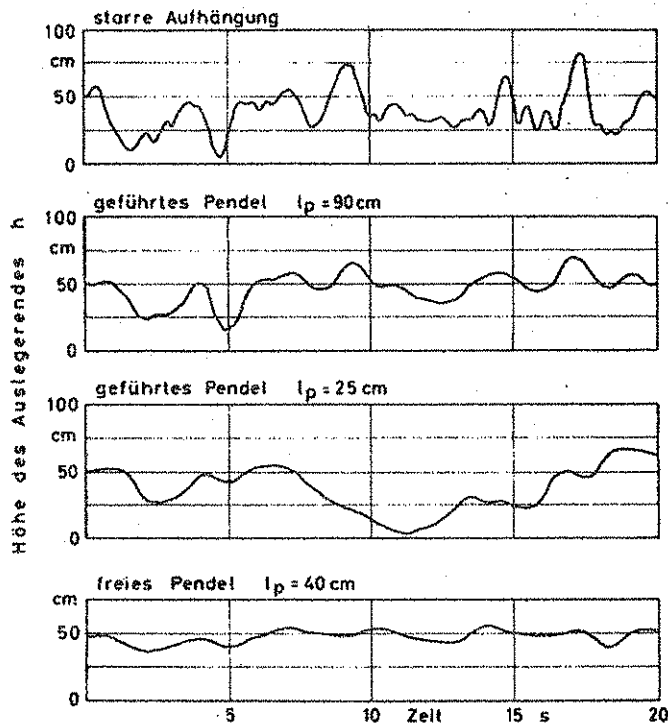
På grund av körbanans råa profil kunde endast låga hastigheter väljas - 1, 2



och 3 km/h. Detta medförde att pendelupphängningarna utsattes för särskilt ogynnsamma förhållanden, med stora amplituder och låga frekvenser nära egenfrekvenserna. Små ojämnheter och högre hastigheter skulle, enligt Schmidt-Ott, inte ha verkat lika störande. Trots detta kunde resultat av olika konstruktiva förändringar studeras.



Figur 35. Försökskörbanans profiler (Schmidt-Ott 1976). Fahrbahn = körbana. Rechtes = högra. Linkes = vänstra. Differenzprofil = differensprofil. Versuchsstrecke = försökssträcka.



Figur 36. Bommens rörelser i olika upphängningar på en försökskörbana. Körhastighet = 2 km/h (Schmidt-Ott 1976). Starre Aufhängung = stum upphängning. Geführtes = styrd. Freies = fri. Höhe des Auslegerendes = bomändens höjd. Zeit = tid.  $l_p$  = pendellängd.

Figur 36 visar typiska resultat av en bomändes lägesavvikelser för upphängningarna i figur 32. Som jämförelse kördes även ett försök med stumt upphängd bom. Försöken kördes med samma hastighet.

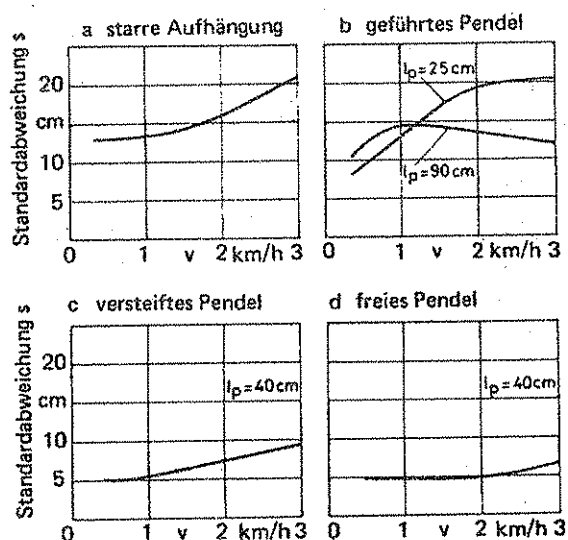
Schmidt-Ott gjorde följande reflektioner kring de erhållna resultaten:

- Den stumt upphängda bommens ände beskriver, i det närmaste körbanans differensprofil (fig 35), vilken ger upphov till traktorns rullningsrörelser.
- En styrd pendel med 90 cm pendelarm ( $l_p = 90$ ) filtrerar visserligen bort störningarnas högfrekventa delar, men blir trots detta tydligt påverkad av rullningsrörelserna. En förklaring till detta förhållande är friktionens inverkan i upphängningen.
- En förkortning av pendelarmslängden medför ytterligare reducering av höga frekvensandelar. Däremot får friktionskrafterna ökat inflytande eftersom den återförande kraftens storlek minskar. Med 25 cm lång pendelarm ( $l_p = 25$ ), uppstår en nära nog oberoende förstärkningsfunktion och bommen driver iväg från sitt ursprungliga läge. Lägesavvikelserna blir större än för en stumt upphängd bom.
- Kan friktionskrafterna undvikas mellan bom och stativ, som sker i den fria pendelupphängningen, minskas konsekvenserna av rullningsrörelserna drastiskt. Bomändens rörelsemönster beskriver nära nog körbanans medelprofil (fig 35).
- Även om en pendelupphängning idealt förmår att isolera bommen från sprut- ekipagets rullningsrörelser, vilka huvudsakligen uppstår på grund av körbanans differensprofil, förmår den inte utjämna dess medelprofil. Höjdskillnaderna i medelprofilen kommer alltså att ange minimivärdena för bommens vertikala rörelser.

En möjlighet till allmän bedömning av upphängningsmetoderna erhöles, enligt Schmidt-Ott, genom att uttrycka de vertikala rörelsernas standardavvikelser som funktion av körhastigheten. I figur 37 kan man jämföra resultatet från en stumt upphängd bom med resultaten från pendelupphängningarna. Schmidt-Ott kommenterade resultaten enligt följande:

- Eftersom de av rullningsrörelserna framkallade accelerationskrafterna, i en stumt upphängd bom, ökar med ökad körhastighet uppstår elastiska deformationer av upphängning och bom. Detta bidrar till att öka storleken av bommens lägesavvikelser (fig 37 a). Härigenom ökar de mekaniska belastningarna på konstruktionens enskilda delar. Stumt upphängda bommar tillåter därför inte höga körhastigheter på ojämna fält och måste bestå av mycket styva konstruktioner.
- Den styrda pendel påverkades påtagligt av friktionskrafter i upphängningen (fig 37 b). Dessa uppstår till följd av horisontala normalkrafter, vilka förekommer på ett icke reproducerbart sätt och i sin tur påverkas av förarens styrningsrörelser. Härav kan en stark spridning av de erhållna mätresultaten, från i övrigt identiska försök, förklaras. Kurvorna utgörs av medelvärden från tre identiska körningar. Av dessa kurvor kan man utläsa att upphängningen med den långa pendelarmen ( $l_p = 90$ ) uppvisar ganska stora lägesavvikelser redan vid låg körhastighet, men att dessa sedan avtar med ökad körhastighet. En förklaring till detta är att friktionskrafterna minskar i förhållande till accelerationskrafterna i rullningsrörelserna. Detta innebär att lagringen mellan bom och stativ skall utföras med så liten friktion som möjligt.
- Pendellängden måste anpassas till bommens massa och tröghet samt upphäng-

ningens friktion. Pendellängden  $l_p = 25$  visar sig under de här förhållandena vara för kort. Återföringskrafterna är för små och ett nästan oberoende lägesförhållande uppstår. Detta medför att bommen driver iväg från sitt börläge, med stora lägesavvikelser som följd.

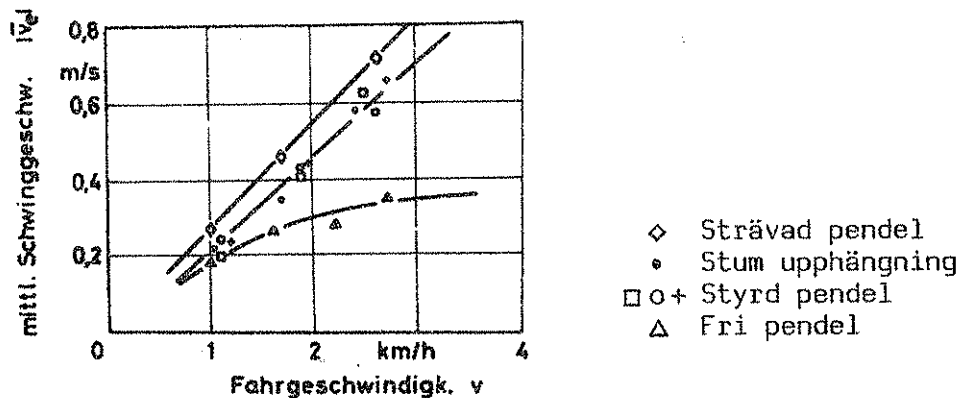


Figur 37. Bomändens vertikala lägesavvikelser som funktion av körhastigheten (Schmidt-Ott 1976). Standardavvikelse = standardavvikelse. Starre Aufhängung = stum upphängning. Geführtes = styrd. Versteiftes = strävad. Freies = fri.  $l_p$  = pendellängd.

- En minskning av lägesavvikelserna kan åstadkommas med en strävad pendel där de horisontala krafterna tas upp av en kraftig lagringskonstruktion (fig 37 c).

Figur 38 visar bomändens horisontala medelsvängningshastigheter som funktion av körhastigheten. Den strävade pendeln, liksom den styrda, medförde ingen reduktion av de horisontala lägesavvikelserna. Däremot visade sig de horisontala medelsvängningshastigheterna ligga högre för den strävade pendeln än för de andra konstruktionerna. Schmidt-Ott ansåg att en förklaring till detta var bomstativets låga böjstyvhet i denna riktning. Utifrån detta förhållande drogs slutsatsen - "Ren fjäderelasticitet medför alltså ingen förbättring av det horisontala rörelseförhållandet, såvida inte dämpningselement samtidigt kan omvandla svängningsenergin". Denna betraktelse ledde till konstruerandet av den fria pendeln, vilken även medgav vridningar i horisontal riktning. En fjäder/dämparekombination omvandlade den tillförda störningsenergin och förde bommen tillbaka till sitt läge tvärs körriktningen.

För den fria pendeln ökade inte de horisontala svängningarnas medelhastighet rätlinjigt med ökad körhastighet, vilket var fallet för den stumt upphängda bommen (fig 38). Enligt Schmidt-Ott blir vätskefördelningen jämnare ju mindre förhållandet är mellan bommens horisontala medelsvängningshastighet och körhastigheten. Därför ansågs en ökning av körhastigheten medföra en positiv verkan för den fria pendeln. Samtidigt ökade de vertikala lägesavvikelserna endast ringa med ökad körhastighet (fig 37 d).



Figur 38. Bomändens horisontala medelsvängningshastighet som funktion av körhastigheten (Schmidt-Ott 1976). Mittl. Schwinggeschw. = medelsvängningshastighet. Fahrgeschwindigkeit = körhastighet.

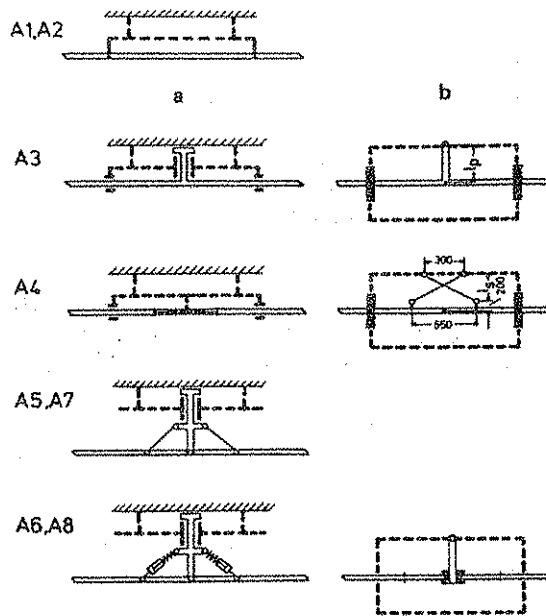
I sammanfattningen till denna del av sin avhandling framhöll Schmidt-Ott följande slutsatser:

- En förbättring av bommens lägeshållning kan åstadkommas med passiv dämpning utan hjälp av aktiv reglering.
- Jämförande bedömningar av olika passivt dämpade konstruktioner är endast möjliga under förhållanden med slumpmässigt fördelade störningar i vertikal och horisontal riktning.
- Stum upphängning av bommen är tillräddlig endast för mindre arbetsbredder upp till ca 10 m.
- Vid ojämna markförhållanden eller hög körhastighet orsakar deformationer av bommen och dess upphängningsanordning stora lägesavvikelser.
- En pendelupphängning kommer fullt till sin fördel endast om friktionen är minimal och pendelarmen har optimal längd. Härigenom kommer de återförande krafterna att vara större än de störande krafterna oavsett lägesavvikelsestorlek.
- Under praktiska förhållanden kan man knappast undvika stora dynamiska krafter mot gejderna, och därigenom stora friktionskrafter, i en styrd upphängning. Eftersom gejderna dessutom har en negativ inverkan på bommens horisontala rörelser bör denna upphängningskonstruktion undvikas.
- En upphängning bör medge rörelsefrihet i horisontal riktning där lägeshållningen kan ske med dämpande återföringselement. Dessa åtgärder kan utföras utan påtagliga merkostnader.

Ganzelmeier & Moser (1977) utförde ungefär motsvarande undersökningar. Dessa omfattade dock ej försök med svängningssimulator. För undersökningarna hade vissa upphängningar av grundmodell valts ut (fig 39).

Försöksutrustningen kopplades till en traktors trepunktskoppling och kunde genom ombyggnad förändras så att samtliga upphängningskonstruktioner kunde undersökas utan att stativ eller bom behövde ändras. Bommen bestod av en 14 m lång styv fackverkskonstruktion. Den hade hög böjstyvhet, i både vertikal och horisontal riktning, för att dess elastiska deformationer skulle vara små och därmed inte störa mätresultaten. Undersökningarna inkluderade även en i mark-

naden förekommande bom. Denna användes stunt upphängd i modell A1. I övriga modeller användes försöksbommen. I modell A2 var denna stunt upphängd. Övriga försöksmodeller hade stora likheter med de som använts av Schmidt-Ott (1976).



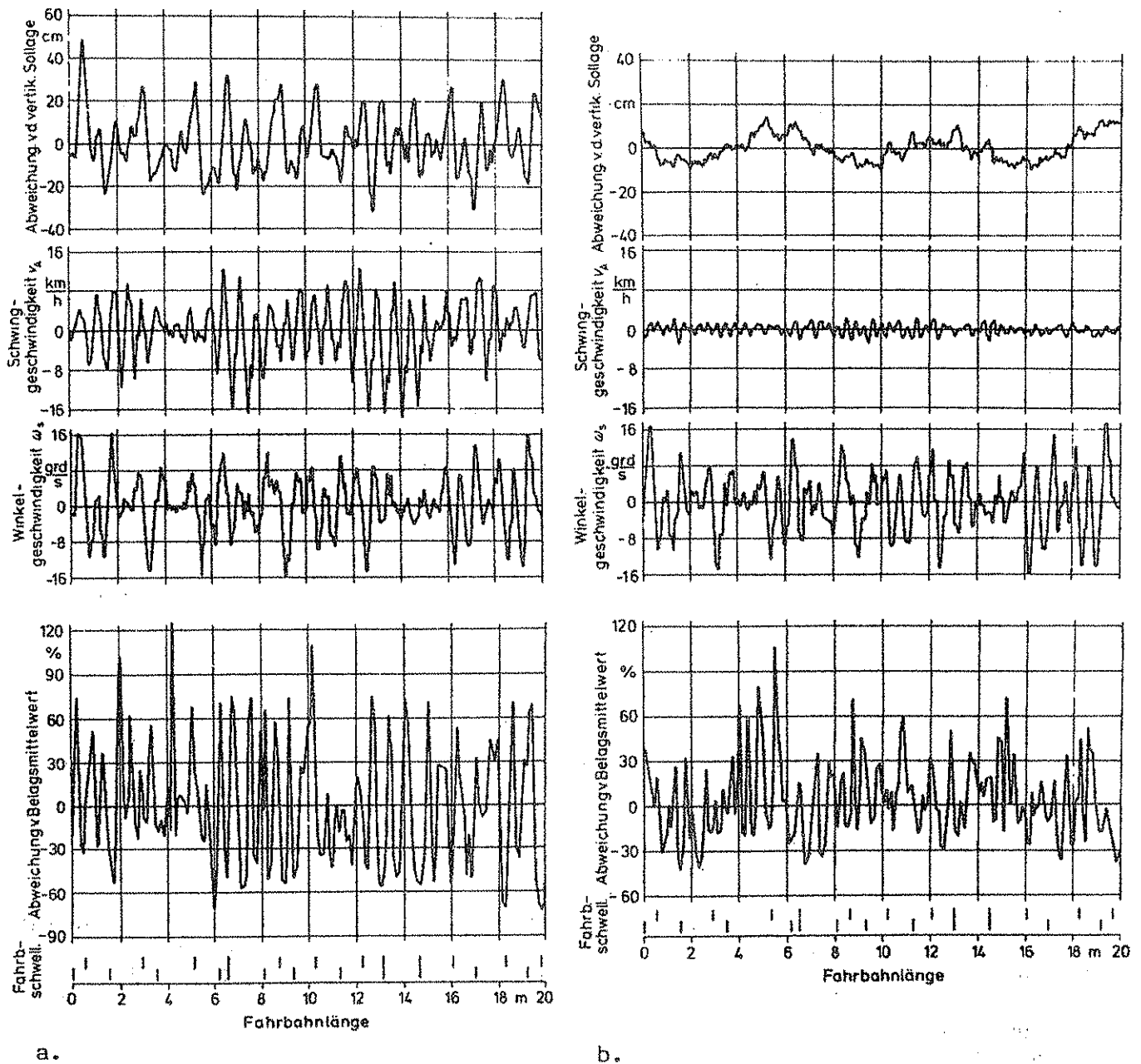
Figur 39. Upphängningar av olika grundmodeller (Ganzelmeier & Moser 1977).  
a) Sedda från ovan. b) Sedda bakifrån.

Beteckning	Upphängningskonstruktion	Mätvärde
A1	Marknadsbom, stunt upphängd	●
A2	Försöksbom, stunt upphängd	○
A3	Styrd pendel, $l_p = 40$ cm	□
A4	Styrd vajerpendel, $l_s = 45$ cm	+
A5	Strävad pendel, $l_p = 40$ cm	▲
A6	Fri pendel, $l_p = 40$ cm	◆
A7	Strävad pendel, $l_p = 60$ cm	△
A8	Fri pendel, $l_p = 60$ cm	◇

Försöken kördes på plöjd åker (I), ängsmark(II) och åkermark efter såbäddsberedning (III). Dessutom användes en definierad körbana (IV) som bestod av en slät betongbana, vilken hade försetts med 6 cm höga hinder tvärs körriktningen. Avstånden mellan hindren hade valts så att vridningsrörelser i alla tre riktningarna skulle uppstå hos ekipaget.

Undersökningarna omfattade mätningar av bommens rörelser, vinkelhastigheten i traktorns rullningsrörelser och jämheten i fördelningen av sprutvätska.

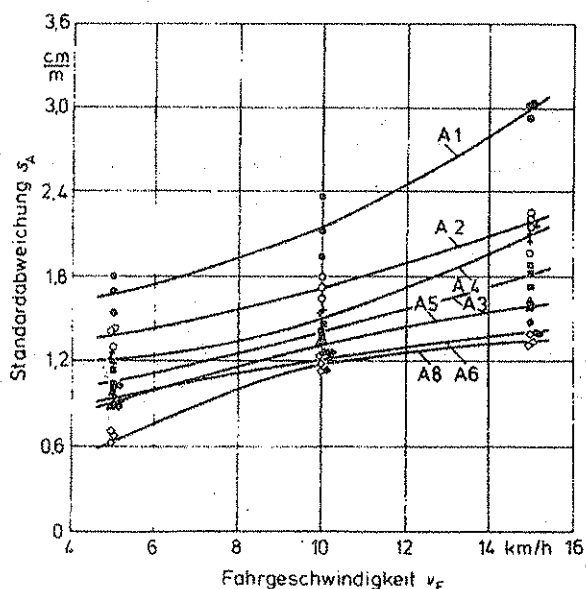
Jämförande försök på den definierade körbanan (IV), med den i marknaden förekommande bommen i modell A1 och försöksbommen upphängd i modell A6, visade påtagliga resultatsförbättringar avseende både bommens rörelser och fördelningen av sprutvätska för den fria pendeln i modell A6 (fig 40). Traktorns rullningsrörelser visade sig vara i stort sett oförändrade mellan de båda försöken.



Figur 40. Bomrörelser, traktorrörelser och fördelning av sprutvätska vid försök på en definierad körbana (IV) (Ganzelmeier & Moser 1977). Körhastighet = 3 km/h. a) Modell A1. b) Modell A6. Abweichung v d vertik. Sollage = avvikelse från det vertikala bör-läget. Schwinggeschwindigkeit = svängningshastighet. Winkelgeschwindigkeit = vinkelhastighet. Abweichung v. Belagsmittelwert = avvikelse från medelgiva. Fahrb. schwell. = hinder på körbanan. Fahrbahn-länge = körbanans längd.

Från försök utförda på åkermark efter såbäddsberedning (III) framgår av figur 41 att "marknadsbommens" (A1) otillräckliga böjstyvhet resulterade i större vertikala standardavvikelser än försöksbommen upphängd på samma sätt, i stum infästning (A2). Pendelupphängning av bommen mellan styrande gejdarrar (A3 och

A4) gav en förbättring i förhållande till stum upphängning (A2). Den strävade pendeln medförde en ytterligare förbättring på grund av att de horisontala kraftpåkänningarna inte verkade mot gejdern i denna konstruktion och genom friktion därmed kunde störa bommens vertikala rörelser. Standardavvikelse var minst för den fria pendeln (A6 och A8).

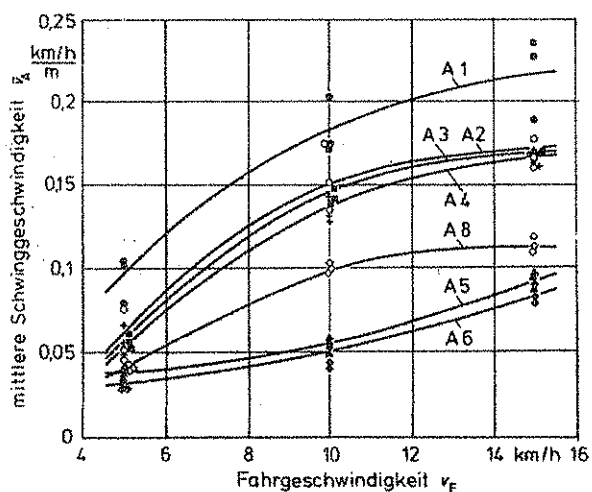


Figur 41. Standardavvikelse i cm per m av bommens halva längd, för dess avvikelse från sitt börläge i vertikal riktning, vid olika körhastigheter. Försöken är utförda på åkermark efter såbäddsberedning (III) (Ganzelmeier & Moser 1977). Standardabweichung = standardavvikelse. Fahrgeschwindigkeit = körhastighet. Övriga förläringar - figur 39.

Av figur 42 från samma försöksserie framgår att "marknadsbommen" (A1) med sin låga böjstyvhet uppvisade den högsta horisontala svängningsmedelhastigheten. Genom att gejderna ersattes med försträvningar (A5) eller fjäder-/dämparrellement (A6) minskades svängningsmedelhastigheten ytterligare. På grund av att pendelarmen i försöken hade låg vridstyvhet var medelsvängningshastigheten större för modell A8, med den längre pendelarmen.

I den tidigare refererade engelska fältförsöksserien med 14 burna respektive bogserade sprutor (Nation & Holden 1976 b och Nation 1982 a) erhöll man även följande resultat. De vertikala rörelserna, uppmätta vid sprutbommens mittpunkt, bidrog i medeltal för samtliga försök endast med 9,5 % till bomändarnas rörelser. Inte i något försök översteg detta värde 30 %. Av försöksseriens resultat drog man slutsatsen att bommen skall bestå av en styv konstruktion, samt att den ska hängas upp på ett sådant sätt att den kan isoleras från sprutans snabba rullnings- och girningsrörelser.

Vid NIAE i England (Nation & Holden 1975 och Nation 1978 a) konstruerades en upphängning i vilken bommen lagrades kring två pivåaxlar, en s k kardansk upphängning. I denna tilläts bommen utföra svängningar i både vertikal och horisontal riktning. De återförande krafterna mot jämviktsläget åstadkoms med ett fjäder-/dämparearrangemang.

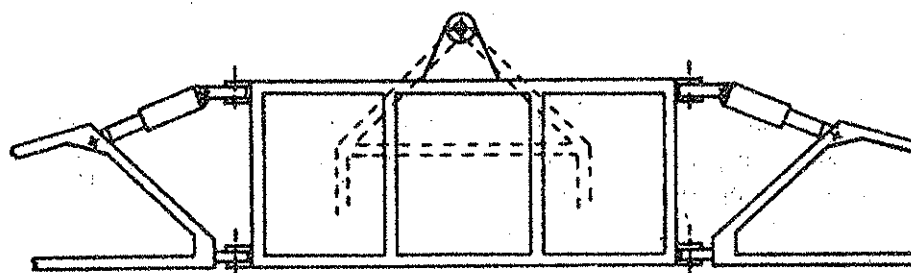


Figur 42. Horizontal medelsvängningshastighet i km/h per meter av bommens halva längd, som funktion av körhastigheten. Försöken är utförda på åkermark efter såbäddsberedning (III) (Ganzelmeier & Moser 1977). Mittlere Schwinggeschwindigkeit = medelsvängningshastighet. Fahrgeschwindigkeit = körhastighet. Övriga förklaringar - figur 39.

Denna upphängningskonstruktion visade sig reducera bommens lägesavvikelser med 50 % i vertikal riktning och 60 % i horisontal riktning, jämfört med samma bom stunt monterad på sprutan. Försöken utfördes på en standardiserad försökskörbana. Genom att fästa vikter vid bomändarna ökades bommens tröghetsmoment, dess egenfrekvens minskade och bomändarnas lägesavvikelser reducerades påtagligt. Nation menade att man kunde förvänta sig att denna metod ytterligare kunde förbättras genom val av optimala dämpningskoefficienter i förhållande till störningarna, bommens egenskaper och de återförande fjäderkrafterna.

Förutom möjligheten till lägesanpassning av en enpunkts pendelupphängd bom genom förskjutning av upphängningspunkten i förhållande till bommens tyngdpunkt (fig 28) nämnde Nation (1978 a) även följande metoder:

- Med hjälp av hydraulcylindrar kan bommens yttersektioner vinklas i förhållande till dess mittsektion, som hela tiden behåller sitt horisontala läge (fig 43).



Figur 43. Pendelupphängning med individuell lägesreglering av bommens yttre sektioner (Nation 1978 a).

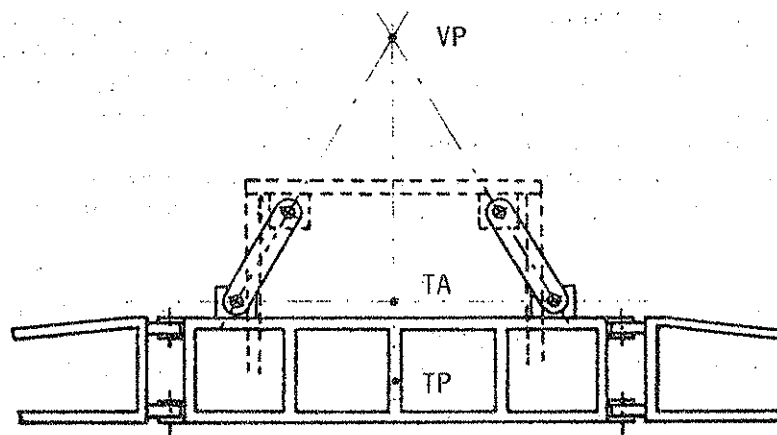


- Balansvikter, upphängda i bommens upphängningspunkt, kan förskjutas i förhållande till pendelarmen m h a en hydraulcylinder. På så sätt förskjuts systemets tyngdpunkt i förhållande till dess upphängningspunkt och bommen intar ett nytt läge.
- Balansvikter i bommen kan förskjutas i förhållande till denna.
- Vätska kan pumpas mellan vätsketankar - en i vardera bomhalvan.

Nackdelen med de här metoderna angav Nation vara att de medför en belastning för sprutföraren, speciellt vid körning och vändningar på sluttande fält. Isynnerhet för långa och tunga bommar medför extra tyngd, i form av balansvikter, ytterligare en nackdel.

Nation menade också att utrustning för automatisk lägeshållning skulle kunna anslutas till en upphängning enligt figur 43.

En relativt vanlig upphängningskonstruktion är den s k trapetsupphängningen. I denna bärs bommen upp av sprutans stativ via länkarmar. Med utgångspunkt från deras lutning kan två grundformer urskiljas, en A-form och en V-form. I A-formen skär förlängningarna av länkarmarnas längdaxlar varandra i en punkt ovanför upphängningspunkterna i sprutans stativ (fig 44). I V-formen skär de varandra i en punkt under upphängningspunkterna i bommen (fig 45). Oftast konstrueras upphängningarna så att de kan ställas om mellan dessa båda former.



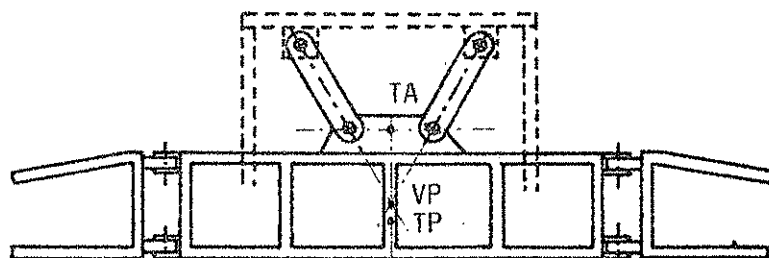
Figur 44. Enkel trapetsupphängning av A-form (efter Nation 1978 a).

VP = virtuell upphängningspunkt. TA = tyngdkraftens angreppspunkt.  
TP = bommens tyngdpunkt.

Till sin funktionsprincip kan trapetsupphängningen betraktas utgöra en pendelupphängning. Den lägeshållande kraften, som verkar på bommen i riktning mot dess jämviktsläge, uppstår genom tyngdkraftens inverkan. Till skillnad från förhållandena i en pendelupphängning är bommens jämviktsläge inte enbart beroende av tyngdkraftens riktning utan även av sprutans (stativets) lutning, samt upphängningens geometri.

Den återförande kraften ger upphov till ett moment som verkar på bommen kring dess virtuella upphängningspunkt VP, vilken är belägen i skärningspunkten mellan förlängningarna av länkarmarnas längdaxlar. I en upphängning av A-form

befinner sig VP därför ovanför tyngdkraftens angreppspunkt TA, vilken befinner sig på en rak linje mellan upphängningspunkterna i bommen (fig 44). Där-  
emot råder det motsatta förhållandet i en upphängning av V-form (fig 45).  
Denna kan därför liknas vid en inverterad pendel.



Figur 45. Enkel trapetsupphängning av V-form (efter Nation 1978 a).

VP = virtuell upphängningspunkt. TA = tyngdkraftens angreppspunkt.  
TP = bommens tyngdpunkt.

Under förutsättning att en upphängning av V-form i övrigt har samma konstruktionsmått som en upphängning av A-form, kommer dess nominella momentarm  $p_0$  att vara kortare än A-formens. Med den nominella momentarmen  $p_0$  avses här avståndet mellan VP och TA, förutsatt att sprutans stativ står vertikalt och att bommen befinner sig horisontalt i sitt jämviktsläge. Förhållandet beror på att V-formens VP och TA båda befinner sig på samma sida om trapetsen (fig 45). I A-formen däremot befinner sig dessa båda punkter på var sin sida om trapetsen (fig 44). Detta medför att en upphängning av A-form uppvisar ett större återförande moment på bommen vid given vinkelförändring av dess läge i vertikalplanet (bilaga 2). Härav följer även att bommen gör ett större vinkelutslag för en given belastning i vertikal riktning då den är upphängd i en trapetsupphängning av V-form, förutsatt att ovanstående förutsättningar gäller (bilaga 3).

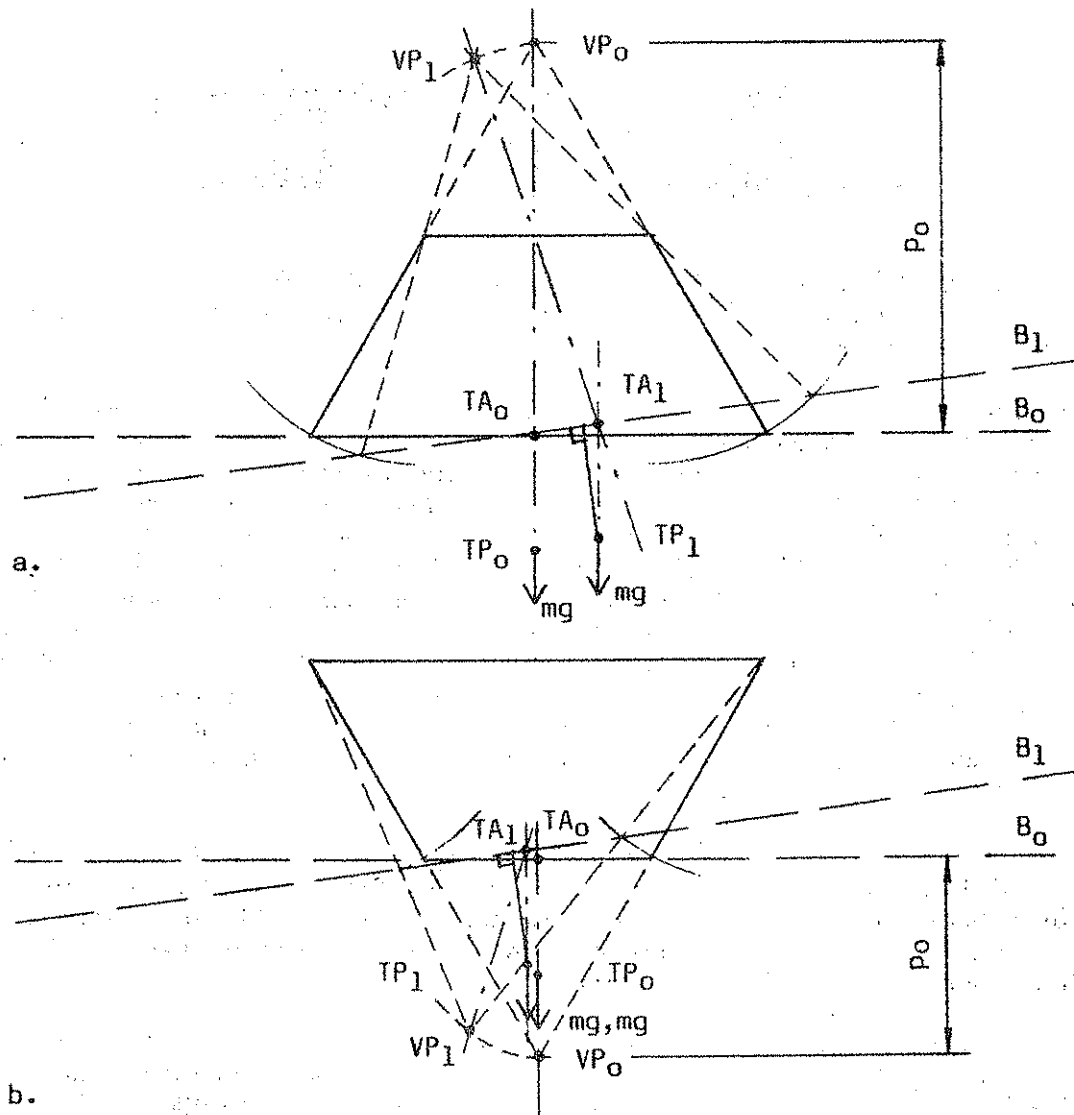
En förändring av bommens lutning i förhållande till stativet medför att VP lämnar sitt neutralläge och förflyttar sig i sidled längs en kurvformad bana in mot trapetsen (fig 46). Banans form bestäms av trapetsens geometri. Även TA flyttas i sidled mellan upphängningspunkterna i bommen, förutsatt att inte bommens tyngdpunkt sammanfaller med TA.

Det återförande momentets storleksförändring, som funktion av bommens lutning, styrs av komplicerade matematiska förhållanden. Denna förändring kan emellertid studeras relativt enkel med grafiskt beräkningsförfarande. För att åskådliggöra momentets beroende av upphängningens geometri har sådana beräkningar utförts för några olika upphängningar i bilaga 2.

I en vidareutveckling av trapetsupphängningen används dubbel uppsättning länk-  
armar. Dessa anordnas i två nivåer med ett mellanhängande ok och bildar på så  
sätt två sammanhängande trapetser. Dubbeltrapetsen byggs upp så att samtliga  
länkarmar arrangeras i antingen A- eller V-form. En omställning mellan dessa  
båda former är möjlig även i denna konstruktion (fig 47).

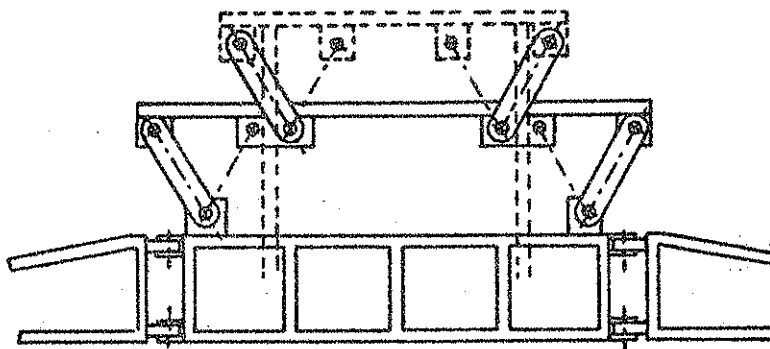
I dubbeltrapetsen existerar det följaktligen två virtuella upphängningspunkt-  
er och upphängningen kan därför till sin funktion närmast liknas vid en pen-  
delupphängning med delad pendelarm.

Den sammanlagda nominella momentarmen kommer även i detta utförande att vara kortare i en upphängning av V-form än en av A-form, förutsatt att upphängningarna i övrigt har identiska mått. Härav följer att en dubbelupphängning av V-form uppvisar ett lägre återförande moment och därmed gör ett större vinkelutslag för en bestämd vertikal belastning än motsvarande upphängning av A-form (bilaga 3).



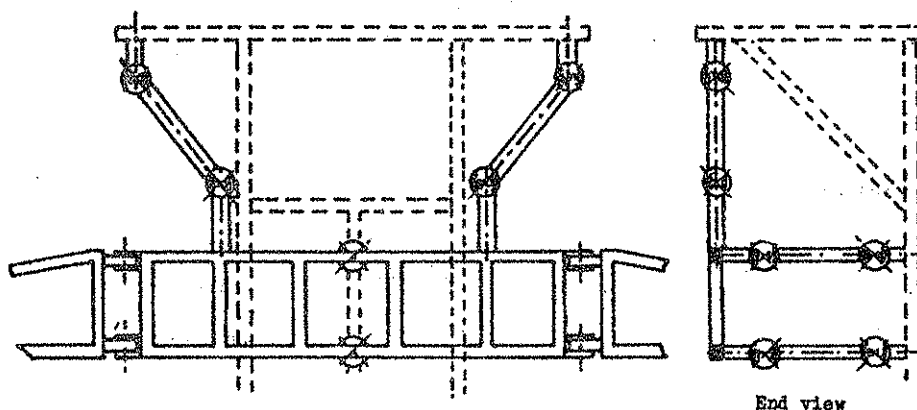
Figur 46. Den virtuella upphängningspunktens (VP) och tyngdkraftens angreppspunkts (TA) förflyttningar i en trapetsupphängning av a) A-form och b) V-form vid lutning av bommen i förhållande till stativet (egen sammanställning).  $p_0$  = nominell momentarm. B = bom. Index: 0 = neutralläge, 1 = bommen har lutats. TP = bommens tyngdpunkt.  $mg$  = tyngdkraften.

Styrningen av en trapetsupphängd bom, i horisontal riktning, kan ske med hjälp av gejdrar eller genom att göra länkmarmarna tillräckligt vridstyva och utföra deras lagringar med god precision.



Figur 47. Dubbel trapetsupphängning av Demaret-typ (Nation 1978 a).

Vid NIAE i England (Nation 1978 a) har man konstruerat en trapetsupphängning som även i horisontal riktning styrs av tyngdkraften. Genom att förse länkarmarna med kardanleder och dessutom förbinda bommen med sprutans stativ i horisontal riktning, med länkarmar och kardanleder, kan detta åstadkommas (fig 43). Inga uppgifter finns om att denna konstruktion förekommer i praktisk tillämpning.



Figur 48. Enkel trapetsupphängning med kardanledade länkarmar utvecklad vid NIAE i England. Bommens horisontala läge fixeras till sprutans stativ med länkarmar + kardanleder (Nation 1978 a). End view = sidoprojektion.

I danska försök utförda av Madsen (1977) filmades en bomände mot en referensbakgrund då en traktor med spruta passerade över olika hinder. Bommen var trapetsupphängd och kunde köras i antingae låst eller flytande läge. Upphängningen visade sig reducera de vertikala lägesavvikelserna då den kördes i flytande läge. Däremot reducerades inte bommens horisontala lägesavvikelser.

Om trapetsupphängningar (enkeltrapets) av A-form skrev Nation (1978 a) att bommen intar ett läge mellan horisontalt läge och markens lutning. För arbete på lutande fält måste trapetsupphängningen antingen kunna låsas eller vara försedd med möjligheter till kompensering. Nation menade att en trapetsupphängning av V-form mycket starkt strävar efter att inta ett markparallellt läge. A-formen rekommenderades för körning på fält utan lutningar, medan

V-formen rekommenderades för körning på lutande fält.

I samband med litteraturstudien byggdes en modell av ett stativ med upphängningsanordning och bom med delar ur en Mekanolåda (bilaga 3). I modellen kunde trapetsupphängningar av varierande geometrier konstrueras.

Enkla försök med modellen visade att bommens jämviktsläge, i förhållande till stativet, långtgående var beroende av trapetsernas geometrier. Lutningsförhållandena för bommen, upphängd i en enkel trapetsupphängning av A-form, var ungefär 0,6 gånger stativets lutning från vertikal ställning, dvs 5° lutning av stativet resulterade i 3° lutning av bommen. För en dubbeltrapets av A-form var förhållandet ungefär 0,3. För enkla trapetsupphängningar av V-form erhöles lutningsförhållandena 1,4 och 1,6. För dubbeltrapetsupphängningar av V-form erhöles lutningsförhållandena 1,4 - 2,1. Inte i något fall visade sig bommens lutning motsvara stativets.

I modellen åskådliggjordes även förhållandet att den nominella momentarmslängden  $p_0$  ökar då länkarmarnas lutning ändras i riktning från horisontal till vertikal lutning. Detta visade sig på så sätt att bommens pendlingsfrekvens ökade vid en mer upprätt ställning av länkarmarna.

Dubbeltrapetserna visade sig ge bommen lugnare rörelser än enkeltrapetserna. Detta beror på att bommen, upphängd i en dubbeltrapets, inte tvingas röra sig lika mycket i sidled, i förhållande till stativet, vid givna vinkelutslag av detta. Dubbeltrapetsernas likhet med en pendel med delad pendelarm gör även att bommen i mindre grad utsätts för vridande moment kring sitt tröghetscentrum.

#### "Direkt/indirekt stabilisering"

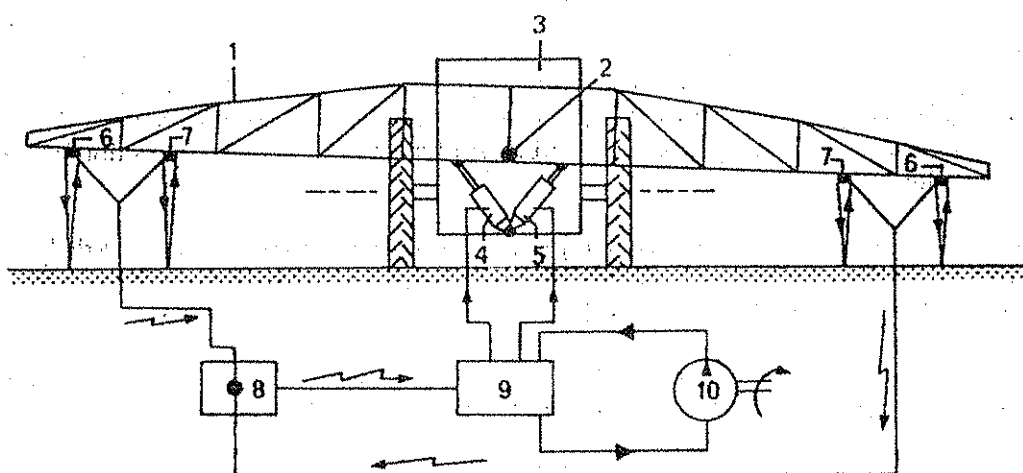
I sin avhandling gjorde Schmidt-Ott (1976) en uppdelning av begreppet "aktiv stabilisering" i dels "direkt", dels "indirekt stabilisering":

- Den direkta stabiliseringen sker enklast genom att bommen förses med stödorgan i form av hjul eller medar. Härigenom kommer den att kontinuerligt befinna sig i kontakt med marken. Markstöden har två funktioner - avståndsgivare och kraftöverföringsorgan.
- Genom upphängning och lagring av bommen i dess tyngdpunkt kan storleken av reaktionskrafterna hållas nere. Dessa stöd bör vara försedda med en elastisk dämpningsfunktion, varmed den tillförda energin kan omvandlas och dess skadliga inverkan på bommens lägeshållning reduceras. Denna dämpningsfunktion bör även finnas i de buffertorgan som skall skydda bommen från att slå i marken.
- Fördelarna med direkt stabilisering är att metoden möjliggör stora arbetsbredder samt att dess funktion är enkel och säker.
- Nackdelarna med direkt stabilisering är att den medför försvårad höjdställning av bommen, kontinuerlig markkontakt och begränsad manövrerbarhet av sprutekipaget. Markkontakten medför dels att växtbeståndet kan skadas, dels att detta kan störa den lägeshållande funktionen.

Enligt styr- och reglertekniska begrepp är den direkta stabiliseringen att betrakta som passiv dämpning. Schmidt-Ott betecknade dock denna som "aktiv stabilisering". Med "indirekt stabilisering" avsåg han en lägeshållning av bommen som sker utan markkontakt genom stödorgan.

## 5.2.5.2. Aktiv dämpning

Med denna metod kompenseras sprutans störande rörelser genom tillförsel av extern energi till svängningssystemet via ett regler-system, på ett sådant sätt att krafter genereras mot dessa rörelser (fig 49).



Figur 49. Schematisk bild av ett aktivt regler-system för lägeshållning av bommen i förhållande till marken eller växterna (Musilami, S et al, 1982)(Evrard).

- |                                  |                               |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Bom                           | 2. Upphängningsaxel           |
| 3. Stativ                        | 4,5. Hydraulcylindrar         |
| 6,7. Avståndsmätare (ultraljud)  | 8. Elektronisk mikroprocessor |
| 9. Elektro-hydraulisk servventil | 10. Traktordriven hydraulpump |

Aktiv dämpning är endast sparsamt behandlad i litteraturen. Följande utgör referat ur Schmidt-Ott (1976):

- Svårigheterna med aktiv dämpning är att kontinuerligt och exakt kunna bestämma bommens lägesavvikelser. I vertikal riktning bestäms dessa genom mätning av bommens avstånd till marken eller växterna. Sådana referens-ytor uppvisar ofta olikartade former och heterogena strukturer, vilket medför starkt störande inverkan på mätningarna.
- De verkligt stora svårigheterna med aktiv dämpning är dock att bestämma bommens horisontala lägesavvikelser. Dessa måste bestämmas genom mätning av bomändarnas momentana hastigheter, i förhållande till bommens medelhastighet.

Schmidt-Ott har i sin avhandling därför endast behandlat möjligheten till aktiv dämpning i vertikal riktning.

Målet för denna metod angav han vara att bommen skall kunna föras fram parallellt med en godtycklig markyta eller ett godtyckligt växttäckte. Härigenom kan sprutföraren avlastas från uppgiften att kontinuerligt övervaka och justera bommens läge under besprutningsarbetet.

Avståndsmätningen till marken eller växterna skall helst ske beröringsfritt.

Avståndsmätningen till marken eller växterna skall helst ske beröringsfritt. Följande principiella metoder är tänkbara:

1. Mekanisk mätning
2. Pneumatisk mätning
3. Optisk mätning
4. Akustisk mätning

Mekanisk mätning som sker genom beröring uppvisar nackdelar delvis motsvarande dem som gäller för den "direkta lägesanpassningen". Dessutom kan de accelerationskrafter som överförs från bommen till avkänningsorganet få stor inverkan på avståndsmätningarna till ett växtbestånd där små avkänningskrafter måste användas.

Pneumatisk avkänning kan ske med hjälp av närmandesensorer. Nackdelen med dessa är att de endast fungerar på korta avstånd, ca 10 cm, och att vindpåkänningar kan ha störande inverkan.

Optisk avståndsmätning kan ske genom att ljus reflekteras mot målobjektet/en. Avståndet kan även mätas till en extern ledljusstråle.

Akustisk avståndsmätning kan ske genom att låta ultraljud reflekteras mot markytan eller växterna.

Det lägeskorrigerande momentet på bommen skapas i allmänhet med hjälp av en hydraulisk eller pneumatisk cylinder. Denna kan verka på följande sätt:

1. Infäst mellan bommen och sprutans bomstativ (fig 49).
2. Mellan bommen och marken via t ex ett stödhjul.
3. Mellan bommen och dess pendelarm. Detta medför en förskjutning av bommens upphängningspunkt i förhållande till dess tyngdpunkt.
4. Mellan bommen och en rörlig vikt i bommen. Detta medför en förskjutning av bommens tyngdpunkt i förhållande till dess upphängningspunkt.

Svårigheterna i metoderna 1 och 2 är att reaktionskraften inte kan föras in i en fast punkt. Detta innebär att cylindern skall kunna utöva korrigerande kraftverkan på bommen samtidigt som den skall medge rörelsefrihet mellan bommen och sprutans stativ eller bommen och dess stödorgan.

Metoderna 3 och 4 innebär att cylindern endast behöver arbeta då bommens läge avviker från börvärdet. Eftersom bommen i de här metoderna kan utföra fria svängningar måste regleranordningen ha en dämpande verkan för att undgå bommens egensvängningar och reglerkretsens instabilitet.

## 6. BOMRÖRELSERNAS STORLEK

Vid observation av ett sprutekipage i arbete får man snart intryck av att bommens lägesavvikelser är störst ute vid bomändarna, dvs att lägesavvikelsena ökar med ökat avstånd från bommens mittpunkt. Detta medför att bomändarnas lägesavvikelser ökar med ökad bomlängd. Förhållandet bekräftas av resultaten i den engelska försöksserien (Nation & Holden 1976 b och Nation 1982 a) där man, som tidigare nämnts (pkt 5.2.5.1.), konstaterade att de vertikala lägesförändringarna vid bommens mittpunkt endast bidrog med i genomsnitt 9,5 % till bomändarnas vertikala lägesavvikelser. Inte i något fall översteg detta värde 30 %. Obs! Försöksserien kördes med stumt upphängda 6-12 m långa bommar av relativt lätta konstruktioner försedda med leder, stag och vajrar.

Försök utförda på såbäddsberedd mark med olika bomupphängningar (Ganzelmeier & Moser 1977) visade att standardavvikelsena för bommens vertikala lägesavvikelser varierade mellan 1,0 och 2,0 cm per meter avstånd från bommens mittpunkt vid en körhastighet av 8 km/h. Detta medför omräknat till 12 m bomlängd, att de vertikala standardavvikelsena för bomändarnas lägesavvikelser är av storleksordningen 6-12 cm. Resultatet har beräknats från figur 41.

Den engelska försöksserien med 14 sprutor (Nation 1978 b och Nation 1982 a) bekräftar dessa värden. Man erhöll standardavvikelser mellan 3 och 10 cm för bomlängder mellan 6 och 12 m. De sammanlagda maximala vertikala lägesavvikelsena vid bomändarna, uppåt + nedåt, varierade mellan 20 och 60 cm.

I Ganzelmeiers & Mosers (1977) försök varierade bommens horisontala medelsvängningshastigheter mellan 0,04 och 0,16 km/h och meter avstånd från bommens mittpunkt vid en körhastighet av 8 km/h (fig 42). Detta medför att bomändarnas medelsvängningshastighet för en 12 m lång bom skulle vara av storleksordningen 3-12 % av sprutekipagets körhastighet.

I den engelska försöksserien (Nation 1978 b och Nation 1982 a) varierade standardavvikelsena för bomändarnas horisontala svängningshastigheter mellan 10 och 30 % av körhastigheten. De maximala horisontala svängningshastigheterna varierade mellan 25 och 110 %. Obs! Försöksserien kördes med i marknaden förekommande sprutor, vars bommar utgjordes av relativt lätta konstruktioner. Dessa var ofta försedda med leder, stag och vajrar, till skillnad från den försöksbom som användes av Ganzelmeier & Moser (1977). Denna utgjordes av en styv fribärande facksverkskonstruktion utan leder.

Speelman & Jansen (1974) gjorde försök med fyra sprutor med arbetsbredder från 15,75 till 20 m. Dessa sprutor var försedda med olika bomupphängningar. Försöken kördes dels på obearbetad fjolårsplöjd mark, dels på såbäddsberedda delar av samma fält. Under de sistnämnda förhållandena uppmättes vertikala lägesavvikelser för bomändarna upp till 0,4 m. På den obearbetade plöjningen uppgick detta värde till 0,5 m. Samtidigt uppmättes horisontala hastighetsvariationer mellan 0,5 och 2 gånger sprutekipagets körhastighet.

I samma försöksrapport anges s k "effektiva accelerationsvärden" för bomändarnas rörelser. Dessa tolkas här som medianvärden för de accelerationsvärden som uppmätts jämnt fördelade över tiden. På obearbetad plöjning erhöles 0,84 g i vertikal riktning och 0,51 g i horisontal riktning. På de såbäddsberedda delarna av samma fält erhöles 0,32 g i vertikal riktning respektive 0,23 i horisontal riktning.



Den engelska fältförsöksserien med 14 sprutor (Nation & Holden 1976 a) visade standardavvikelser för de vertikala accelerationsvärdena mellan  $10 \text{ m/s}^2$  och  $30 \text{ m/s}^2$ . Medelstandardavvikelsen för samtliga sprutor låg i intervallet  $10$ - $15 \text{ m/s}^2$ . I horisontal riktning uppmättes standardavvikelser mellan  $3 \text{ m/s}^2$  och  $15 \text{ m/s}^2$ , medelstandardavvikelsen låg omkring  $8 \text{ m/s}^2$ .

En analys av uppmätta vertikala accelerationsmaxima visade att värden upp till  $110 \text{ m/s}^2$  kunde förekomma. Man misstänkte att de kunde vara ytterligare något högre på grund av att accelerometrarnas linjära mätområde var begränsat till  $\pm 9 \text{ g}$ . Det förekom ofta att de nedåtriktade accelerationsvärdena var markant högre än de nedåtriktade, vilket resulterade i storleksmässigt asymmetriskt fördelade lägesavvikelser. Detta medförde en förskjutning uppåt av oscillationscentrum. I horisontal riktning förekom inte påtagligt någon sådan asymmetri.

Från samma försöksserie (Nation 1976 b) redovisas bomrörelsernas amplituder som funktion av frekvensen i två st spektraleffektthetsdiagram (begrepps-förklaring - pkt 5.1.1.). De kan tyvärr inte återges här på grund av att de är otydliga. Det framgår dock att de största amplitudvärdena återfinns i de lägre frekvensområdena. I vertikal riktning  $0,5$ - $3,5 \text{ Hz}$  och i horisontal riktning  $0,5$ - $1,5 \text{ Hz}$ . En matematisk filterfunktion tog bort värdena för frekvenser lägre än  $1/3 \text{ Hz}$ .

## 7. DISKUSSION

### 7.1. Resultat, egna synpunkter och slutsatser.

Med utgångspunkt i tillgängliga försöksresultat visar det här arbetet att sprutbommens rörelser allvarligt kan störa resultatet av en kemisk bekämpningsåtgärd. Det är därför väsentligt att bomrörelserna kan reduceras till ett minimum. Denna reduktion kan åstadkommas genom sådant utförande av bommens upphängning att sprutan medges viss rörelsefrihet i förhållande till bommen. I upphängningsanordningen ges härmed möjligheter till antingen isolering från sprutans störande rörelser eller, med tillsats av ett reglersystem, kompensering av dessa rörelser. Metoderna benämns passiv respektive aktiv dämpning och innebär att intern störningsenergi avleds från svängningssystemet respektive extern energi tillförs detta.

Bomrörelserna har konstaterats uppkomma huvudsakligen till följd av sprutekipagets vridningsrörelser kring sina längd- respektive vertikalexlar (se pkt 5.). Detta medför att storleken och därmed verkningarna av bommens rörelser ökar med ökat avstånd från bommens upphängningspunkt. Följaktligen är det därför mer angeläget att förse en lång bom med utrustning för förbättrad lägeshållning än en kort.

En annan högst påtaglig negativ konsekvens av stora bomlängder är att de mekaniska belastningarna på bommen och dess upphängning ökar progressivt med ökad bomlängd (pkt 5.2.4.). En passivt eller aktivt dämpad upphängning av bommen medför även att dessa belastningar väsentligen reduceras, vilket ger bommen ökad hållbarhet.

I litteraturen (pkt 5.2.5.) anges att bommar längre än 10-12 m bör vara försedda med utrustning för förbättrad lägeshållning. Egna jämförelser mellan olika försöksresultat styrker denna uppfattning. Denna utrustning skall möjliggöra dämpning av bommens svängningar i både vertikal och horisontal riktning, rörelseformerna 2 och 3 i figur 16. Helst bör även bommens transversella vertikalarörelser, enligt rörelseform 1, dämpas.

Sprutbommens rörelser uppkommer då sprutekipaget körs över en ojämn markyta. Rörelserna är till sin karaktär beroende av ett antal orsakande och samverkande faktorer.

Generellt kan konstateras att mängden störningsenergi som tillförs sprutekipaget ökar ju ojämnare markytan är och ju fortare ekipaget körs över denna. Det är därför, även i detta avseende, väsentligt att eftersträva en så jämn markyta som möjligt i samband med föregående jordbearbetning. Ökad körhastighet kan, förutom en påtaglig ökning av störningarnas energiinnehåll, även medföra en förskjutning av störningarnas maximivärden mot högre frekvenser. Detta förhållande har åskådliggjorts vid försök med en relativt vek bom vid körning över konstgjorda hinder. Bommens rörelser minskade vid ökad körhastighet. Slutsatsen av detta förhållande är att tyngdpunkten för störningarnas frekvensvärden försköts bort från bommens relativt låga egenfrekvens.

För en stumt upphängd styv bom, med "hög" egenfrekvens, ökar däremot rörelsernas storlek vid ökad körhastighet. Här medverkar dock även andra faktorer som t ex deformation av sprutekipagets däck mm.

Med en passivt dämpad upphängning kan man uppnå förhållandet att bomrörelsernas storlek ökar degressivt med ökad körhastighet. Detta innebär att för-

hållandet mellan bommens medelsvängningshastighet och körhastigheten minskar med ökad körhastighet, vilket ger en jämnare fördelning av sprutvätskan sedd i sprutekipagets körriktning.

En traktorburna sprutas bomrörelser kan väsentligen reduceras genom att traktorns spårvidd ökas eller genom att traktorn förses med dubbelmontage där förhållandena så tillåter. En ökning av spårvidden från 1,5 m till 2,0 m bör reducera bomrörelsernas storlek 20-30 %. För bogserade sprutor bör en stor spårvidd vara ännu mera väsentlig, eftersom de ofta har längre bommar än de burna sprutorna. Bogserade sprutors bomrörelser kan även reduceras genom att sprutan utrustas med stora hjul eller boggi. Dessa lösningar medför dessutom fördelen att sprutans bärighet ökas. Det är även viktigt att traktorns och den bogserade sprutans däck har rätt ringtryck. För låga tryck ger "vaggande gång" och för höga tryck ger "stötig gång".

För att i största möjliga mån undvika bomrörelser skall bommen utgöras av en böj- och vridstyv fribärande konstruktion. Den skall vara lika böjstyv i horisontal som vertikal riktning. En ideal situation vore om bommen kunde utföras utanleder. För det fall den förses med leder skall dessa utgöra stumma förbindningar mellan bommens sektioner, då sprutan är i arbete. Är inte detta möjligt bör lederna vara försedda med fjädrings- och dämpningsutrustning. Glappande leder och leder som tillåter vinkling av bommen, då sprutan är i arbete, kan annars bidra till att svårkontrollerbara bomrörelser uppstår. Leder för påkörningsskydd ska ha dämpad återgång och fixering till neutral-läget efter en påkörning. Även de buffertorgan som skall förhindra att bommen slår i marken bör vara utrustade med dämpningsfunktion, varmed rekylverkan kan reduceras. Spridarkropparna ska sitta skyddade mot yttre mekanisk åverkan.

Som tidigare nämnts, kan förbättrad lägeshållning åstadkommas med passivt alternativt aktiv dämpning, eller med en kombination av metoderna.

Den passiva metodens fördel är att den kan åstadkommas med relativt enkel och billig teknik. En nackdel är att bommens läge inte kontrolleras och regleras i förhållande till ett exakt och förutbestämt höjdläge över marken eller växterna. Istället relateras dess jämviktsläge till antingen tyngdkraftens riktning eller sprutans lutning. Dessa referenslägen utgör approximationer för den korrekta referensstorheten. Det förekommer även system som samtidigt relateras till både tyngdkraftens riktning och sprutans lutning, t ex trapets-upphängningar eller fjäderstyrda pendelupphängningar.

En annan nackdel med det passivt dämpade upphängningssystemet är att detta är beroende av de ingående maskinelementens fysikaliska egenskaper, vilket innebär att det fungerar bäst under vissa bestämda förhållanden. Ändras dessa förhållanden minskar systemets förmåga att ge bommen en korrekt lägeshållning, t ex på ojämnare mark eller ändrad körhastighet.

En nackdel med den styrda och pendelupphängda bommen är att det är svårt att undvika friktion mellan bommen och de vertikala gejderna. Därmed störs även bommens vertikala lägeshållning av dess horisontala svängningar. En annan nackdel är att bommens jämviktsläge kontinuerligt måste justeras i förhållande till fältets lutning, vartefter denna varierar. Detta medför ett observationsmoment och därmed en belastning för sprutföraren. Det här systemets arbets kvalitet är därmed direkt beroende av fältets lutningsförhållanden och förarens koncentrations och prestationsförmåga.

Likaså måste en bom vars jämviktsläge är relaterat till sprutans lutning

kunna korrigeras då sprutekipaget körs längs långsträckta markojämnheter, t ex med hjulen på dess ena sida i en slutfåra.

För de fall bommens läge är relaterat till både tyngdkraftens riktning och sprutans lutning kommer bommen att inta ett helt korrekt läge, endast då sprutekipaget körs på horisontal mark. Vid körning på tvären i sidolutningar kommer den fjäderstyrda pendelupphängningen och trapetsupphängningen av A-form att hålla bommen i ett läge mellan horisontalt läge och markens lutning. En trapetsupphängning av V-form kommer att överdriva markens lutning. Detta innebär att även dessa system måste kunna lägesjusteras efter fältets lutningar, isynnerhet vid större bomlängder. Tillverkare som använder sig av dubbeltrapetsystemet hävdar att detta förmår ge bommen ett markparallellt läge även vid körning på tvären i sidolutningar, under förutsättning att trapetserna är monterade i V-form. Man betonar vikten av att upphängningens geometri måste vara noggrant anpassad till bommens längd, vikt och viktfördelning (Allaëys 1984, Berthoud 1984).

Egna modellförsök med trapetsupphängningar visade att bommen i mindre grad påverkades av bomstativets (sprutans) rörelser då den var upphängd i en dubbeltrapets istället för i en enkeltrapets. En förklaring till detta är dubbelupphängningens likhet med en pendel vars pendelarm är ledad. Härigenom utsätts bommen i mindre grad för vridande moment, och därmed accelerationer, kring sitt tröghetscentrum pga sprutans (upphängningspunktens) rörelser i sidled. Bommen utför i högre grad rena sidoförflyttningar till följd av sprutans sidorörelser. Analogt bör den pendelupphängda bommen uppvisa lugnare rörelser om dess pendelarm förses med en led.

Svårigheterna med aktiv dämpning består främst i att kontinuerligt och exakt kunna mäta bommens momentana hastigheter och höjdlägen. Särskilt svårt är det att göra hastighetsmätningar i horisontal riktning. Därför sker lägeshållningen aktivt endast i vertikal riktning i existerande kommersiella tillämpningar. En kombination av aktiv dämpning i vertikal riktning och passiv dämpning i horisontal riktning är därför en praktisk lösning. I vertikal riktning kan lägeshållningen ske med en kombination av passiv och aktiv dämpning. T ex kan det passiva systemets jämviktsläge korrigeras med aktiv reglering. En annan tänkbar lösning är att bommens ena halva höjs medan dess andra halva sänks, med hjälp av aktiv reglering, iförhållande till en passivt upphängd mittsektion. Vid körning på kuperade fält skulle detta system även kunna medge att båda bomhalvorna samtidigt kan höjas eller sänkas i förhållande till bommens mittsektion.

Den aktiva dämpningsmetodens nackdelar är att det fordras tekniskt ganska komplicerad och känslig utrustning samt att denna är förhållandevis dyr. I framtiden bör denna utrustning dock vara berättigad på bommar från ca 18 m. Dess avgörande fördel är att en god lägeshållning kan erhållas även för större arbetsbredder.

I kombination med sprutbommens rörelser spelar även spridartypen en avgörande roll för fördelningen av sprutvätskan. Spaltspridaren är okänsligare för höjdlägesvariationer än virvelkammerspridaren. Samtidigt är den genom sin begränsade utbredning av sprutduschen, i körriktningen, känsligare för horisontala hastighetsvariationer. Generellt sett överväger dock spaltspridarens fördelar.

Som följd av förhållandena att bomrörelsernas storlek ökar på ökat avstånd från bommens upphängningspunkt och att nedåtriktade lägesavvikelser stör vätskefördelningen mer än uppåtriktade, bör bomändarnas avstånd till marken

eller växterna vara något större än mittsektionens. Denna avståndsökning bör med utgångspunkt från förekommande standardavvikelser för bomrörelsen och med hänsyn tagen till risker för vindavdrift mm, vara av storleksordningen 0,5-1,0 cm per m avstånd från bommens mittpunkt.

Med åtgärder för förbättrad lägeshållning av sprutbommen erhålls en rad fördelar, bl a följande:

- Jämnare fördelning av sprutvätskan.
- Minskade mekaniska belastningar på bommen och dess upphängningsanordning.
- Större arbetsbredd och/eller högre körhastighet kan användas, vilket betyder ökad kapacitet. Större arbetsbredd ger även en mindre mängd körspår.
- Lägre bomhöjder kan användas. Detta minskar väsentligen riskerna för vindavdrift och avdunstning. Sprutdropparna behåller mer av sin rörelseenergi, vilket resulterar i större anslagskraft och ökad penetrering av växttäcknet. Mindre droppstorlekar och därmed mindre vätskemängder kan användas.
- Säkrare bekämpningsresultat vid användning av små vätskemängder.
- Mindre störningar vid användning av spridare med låg rörelseenergi i sprutduschen.

Ur litteraturen framgår olika möjligheter för förbättrad lägeshållning av sprutbommen ganska klart och detaljerat. Däremot saknas försöksresultat som visar hur mycket preparatdoserna kan sänkas, som följd av en given reduktion av sprutbommens rörelser. Det är därför svårt att här göra en bedömning av investeringsutrymmet för förbättrad lägeshållning av bommen.

I litteraturen (se pkt 4.3.) görs den teoretiska bedömningen att ca 20 % av preparatmängden skulle kunna sparas in om variationskoefficienten för fördelningen av sprutvätskan i fält minskas från 20 % till 10 %. En egen bedömning är att detta bör vara fullt möjligt att nå med förbättrad lägeshållning av bommen i kombination med andra åtgärder, t ex noggrann skötsel och konditionstest av sprutan, samt att besprutningen utförs under gynnsamma förhållanden.

En överblick av vår nuvarande situation i de nordiska länderna visar att problemen kring sprutbommens rörelser hittills ägnats alldeles för lite uppmärksamhet. Detta kan konstateras vid en betraktelse av våra forsknings-, försöks- och provningsverksamheter. Det kan även konstateras vid en granskning av vårt nuvarande utbud av lantbrukssprutor. Oftast utgörs bommarna av förhållandevis kläna konstruktioner med otillräcklig böjstyvhet, isynnerhet i horisontal riktning. De är dessutom ofta försedda med glappande leder och i de fall sprutorna har försetts med utrustning för förbättrad lägeshållning av bommarna sker denna nästan uteslutande i vertikal riktning.

## 7.2. Förslag till provningsmetod.

Givet krav är att provningar av sprutbommens lägeshållande förmåga skall utföras under praktiskt snarlika och reproducerbara förhållanden. Försök på en standardiserad försökskörbana har visat sig tämligen väl kunna tillfredställa detta krav. Däremot medför denna metod ett ganska komplicerat mätförfarande med omfattande och förhållandevis osäkra beräkningar. Bommens momentana hastigheter och lägen beräknas med hjälp av enkel och dubbel integrering av uppmätta momentana accelerationsvärden.

Ett alternativ till denna provningsmetod vore att placera sprutan i en skakrigg, där den kan utsättas för skakningar i tre dimensioner. Mätningarna bör utföras med sprutan i olika lutningar i förhållande till horisontalplanet. Med denna metod skulle kravet på reproducerbarhet kunna tillfredställas och förhoppningsvis även kravet på praktiskt snarlika förhållanden. En enklare och säkrare mätmetod skulle erhållas. Mätningarna skulle kunna utföras som avståndsmätningar till fasta referensplan och ett enklare beräkningsförfarande skulle följaktligen kunna användas. En annan fördel vore att mätningarna skulle kunna utföras inomhus.

I första hand skulle metoden vara lämplig för passivt dämpade upphängningar. Problemet blir att skapa praktiskt snarlika och reproducerbara mätförhållanden för det aktiva systemets lägesavkännare.

Vid CEMAGREF i Frankrike har man konstruerat en simulator med vilken sprutbommarnas rörelser kan studeras - se bilaga 4.

## 8. SAMMANFATTNING

Jämn fördelning av sprutvätskan är avgörande för resultatet av en kemisk bekämpningsåtgärd. Försöksresultat visar att detta allvarligt kan störas av sprutbommens rörelser.

Det här arbetet utgörs till sina största delar av en litteraturstudie. Syftet har varit att beskriva bomrörelserna och deras inverkan på effekterna av en kemisk bekämpningsåtgärd. Målet har också varit att ange metoder för reducering av bomrörelsernas omfattning, samt att ange resultat av dessa metoder.

Sprutbommens rörelser beror huvudsakligen av sprutekipagets vridningsrörelser kring sina längd- och vertikalaxlar. Detta medför att bomrörelsernas storlek ökar på ökat avstånd från bommens upphängningspunkt. I sin tur medför detta att de mekaniska belastningarna på bommen och dess upphängningsanordning ökar tilltagande vid ökad bomlängd. Även veka bomkonstruktioner och glappande leder kan allvarligt störa bommen lägeshållning.

Förbättrad lägeshållning av bommen kan åstadkommas genom att dess upphängning utförs så att sprutan i viss utsträckning medges rörelsefrihet i förhållande till bommen. I upphängningsanordningen ges härmed möjligheter till isolering från sprutans störande rörelser respektive kompensering av dessa. Dessa metoder benäms passiv respektive aktiv dämpning och innebär att intern störningsenergi avleds från upphängningsanordningen respektive extern energi tillförs i denna.

För bästa lägeshållning med dessa metoder krävs att bommen utgörs av en fribärande konstruktion med hög böjstyvhet i både vertikal och horisontal riktning. Dess leder skall under besprutningsarbetet utgöra antingen momentstyva förbindningar eller vara försedda med dämpningsutrustning.

Hittills har bommens horisontala svängningar inte uppmärksammats i berättigad omfattning. Dessa visar sig störa vätskefördelningen i lika hög grad eller mer än de vertikala svängningsrörelserna. Detta gäller isynnerhet då bommen är försedd med spaltspridare. Det är därför väsentligt att bommens rörelser dämpas i både vertikal och horisontal riktning.

Det passivt dämpade systemets förmåga att hålla bommen i dess avsedda läge är dock begränsat i vissa arbetssituationer, t ex vid körning på tvären i sidolutningar eller längs utsträckta markojämnheter. Det passivt dämpade systemet är även beroende av de ingående maskinelementens fysikaliska egenskaper, vilket innebär att systemet fungerar bäst endast under vissa givna förhållanden.

Lägeshållningen i passivt dämpade system, vilka endast verkar i vertikal riktning, visar sig störas av bommens horisontala rörelser, genom kraftöverföring i upphängningsanordningen på grund av friktion. Detta är ytterligare en anledning till att dämpningen skall ske i både horisontal och vertikal riktning.

Ett aktivt dämpat system saknar dessa nackdelar men kräver å andra sidan ganska känslig och dyr utrustning.

Olika undersökningar visar markant reducerade bomrörelser med passivt dämpade system. Aktivt dämpade system förekommer ännu så länge endast i liten praktisk omfattning. Resultat från försök med aktiva system har inte funnits tillgängliga.

Som följd av att bomrörelsernas storlek ökar med ökat avstånd från bommens upphängningspunkt och att nedåtriktade lägesavvikelser stör vätskefördelningen mer än uppåtriktade, bör bomändarnas avstånd över marken eller växterna, vara något större än mittsektionens. Med utgångspunkt i förekommande standardavvikelser för bomrörelser och med hänsyn till risken för vindavdrift mm, bör denna avståndsökning vara 0,5-1,0 cm per m avstånd från bommens mittpunkt.

I litteraturen anges att lantbrukssprutor med arbetsbredder överstigande 10-12 m bör vara utrustade med åtgärder för förbättrad lägeshållning av bommen. En egen bedömning är att aktiv dämpning av bommen bör vara berättigad vid arbetsbredder från 18 m och uppåt.

Med åtgärder för förbättrad lägeshållning av sprutbommen erhålls bl a möjligheter till minskade preparatmängder, ökad kapacitet, minskad vindavdrift och ökad penetrering av växttäcknet. Dessutom reduceras de mekaniska belastningarna på bommen och dess upphängningsanordning.

Det allmänna medvetandet kring de här förhållandena skulle väsentligen kunna ökas om provningar av sprutbommens rörelser ingick som ett moment i förekommande officiella provningar. Detta provningsmoment bör kunna utföras i en stationär provningsrigg, i vilken sprutan skakas i alla tre dimensionerna.



## 9. SUMMARY

This study, which is mainly of literary sources, has been performed to fulfil the requirements of the Swedish University of Agricultural Sciences for the degree of Master of Science.

Uniform spray distribution is of vital importance for successful results of a chemical control measure. Different studies show that spray distribution can be seriously affected by sprayerboom movements.

The objectives of this study have been, firstly, to describe these movements and their influence on the results of a chemical control measure and, secondly, to describe technical methods to reduce these movements and to describe the performances of these methods.

Boom movements are caused mainly by the rolling and yawing movements of the sprayer. This implies that the size of these movements increases at an increased distance from the mounting point of the boom. It also implies that the mechanical strains on the boom and its suspension increase progressively with increased boomlength. Likewise slender boomstructures and looseness in the boomsection joints can severely affect the positioning of the boom.

Improved positioning of the boom can be achieved by designing the boomsuspension so that it allows a certain degree of freedom for the sprayer to move relative to the boom. Possibilities then exist for either isolation from, or compensation for, the disruptive movements of the sprayer. The method of isolation represents a passive suspension system, in which "internal" disruptive energy is absorbed by damping devices. The method of compensation represents an active suspension system, in which external restoring energy is supplied by e.g. a hydraulic cylinder.

In order to obtain the optimal boom positioning with these methods the boom should be a self-supporting structure and as stiff as possible in both directions. When in operation the boomsection joints should either be locked tightly or be provided with damping devices.

Up to now the horizontal boom movements have not received any well justified attention. These movements have shown themselves to affect spray distribution as much as, or even more than, the vertical movements, especially if the boom is equipped with fan spray nozzles. Therefore it is essential that both the vertical and the horizontal boom movements are reduced.

The ability of a passive suspension system to keep the boom in its correct spraying position is however restricted in some situations e.g. when spraying across a side slope (fig 27) or when spraying along furrows (fig 29). Then it has to be corrected, either manually or by means of an active system. The performance of a passive suspension that is effective only in the vertical plane will be disrupted by internal random frictional forces due to the horizontal movements of the sprayer. The performance of an ideal passive suspension that does not have this disruptive internal friction will very much depend on the physical properties of its mechanical components, which implies that this system has an optimal performance only under specific conditions.

An active suspension does not have these disadvantages, but on the other hand it requires rather sensitive and expensive equipment.

Independent research results show pronounced reduction of boom movements with passive suspension systems. Active suspension systems are not yet commonly used in commercial applications. Results from trials with these systems have not been available.

From the fact that the boom movements increase at an increased distance from the mounting point of the boom and that downward movements affect spray distribution more than upward movements do, the conclusion can be drawn that the ends of the boom should be set somewhat higher than the centre section. Considering available standard deviation values of vertical boom displacement and also considering the risk of spray drift etc, the extended sections of the boom should be raised approximately 0,5-1,0 cm per metre distance from the boom mounting point.

According to various authors, a sprayer exceeding 10-12 m working width should be equipped with a boom suspension system designed to reduce boom movements. A conclusion can be drawn from this study is that an active suspension system probably would be justified for working widths exceeding 18 meters.

Among other possibilities and advantages the following should be attained by applying corrective measures for improved boom positioning:

- Reduced application rate.
- Increased work rate.
- Reduced potential for drift of spray.
- Increased penetration of crop canopy.
- Reduced mechanical strain on the boom and the boom suspension.

The general awareness of these factors could be essentially increased if a test of sprayerboom movements were included in official sprayer tests. The test in question can probably be made on a stationary test rig which shakes the sprayer in all three directions.

## 10. REFERENSER

Allaey's 1984. Personlig kommunikation.

Biologische Bundesanstalt (BBA). 1967. Anforderungen an Feldspritzgeräte. BBA Braunschweig 1967-06-26. Stencil 5 s. (Cit Svensson 1976).

Berthoud 1984. Personlig kommunikation.

Cowling, J. 1980. Boom design from the manufacturing point of view. Symposium on Spraying Systems for the 1980's - March 1980. NIAE. Atkinson's of Clitheroe Ltd, Clitheroe, Lancs. BB7 INZ. UK.

Eriksson, T. 1975. Jämnhet och vindkänslighet hos några spridartyper för växtskyddsprutor. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för arbetsmetodik och teknik, Rapport 26. 19 s. Uppsala.

Ganzelmeier, H. & Moser, E. 1977. Einfluß der Auslegerbewegungen von Feldspritzgeräten auf die Verteilgenauigkeit der Spritzflüßigkeit. Grundlagen der Landtechnik, 27(1977):3, 65 - 72.

Göhlich, H. 1968. Beeinflußung der spritzverteilung durch Düsenart und Düsenanordnung beim Feldspritzen. Landtechnik, 23(1968):6, 162-170.

Göhlich, H. 1978. Mehr aufmerksamkeit beim Spritzen. DLG-Mitteilungen, 93(1978):5, 242-245.

Hagenvall, H. 1978. Konditionstest av ogrässprutor. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för arbetsmetodik och teknik, Rapport 44. 38 s. Uppsala.

Hagenvall, H. & Svensson, K. 1982. Nordisk projekt. - Utredning och undersökningar av växtskyddsutrustning. - Biologi-teknik-arbetsmiljö. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för arbetsmetodik och teknik, Rapport 76. 64 s. Uppsala.

Heidt, H. 1976. Automatische Tropfengrößen- und Belagsanalyse in chemischen Pflanzenschutz. Dissertation, Technische Universität, Berlin, 1976, D 83. (Cit Porskamp 1980).

Iyer, R.M. & Wills, B.M.D. 1978. Factors determinig the design of Tractor-mounted Sprayer Booms - Sprayer Nozzle Characteristics. J. agric. Engng Res. 23(1978), 37-43.

Knott, L. 1978. Einfluß horizontaler Spritzgestänge-Schwankungen auf die Längsverteilung. Gesunde Pflanzen, 30 (1978):2, 42-48.

Madsen, F.H. 1977. Arealfordening fra marksprøjter. Undersøgelserover svingninger på en sprøjtebom. Hovedopgave i landbrugsmaskiner. Jordbrugsteknisk Institut, Tåstrup.

Matthews, G.A. 1979. Pesticide Application Methods. Longman Group, London, 1979. (Cit Nilsson 1983).

Musillami, S. Goffre, P. & Sevilla, F. 1982. Les traitements par pulvérisation et les pulvérisateurs en agriculture. Tome 2. Études du Cnemagref. (1982) Nr 488, 59s.

Nation, H.J. 1976 a. Spray nozzle performance and effects of boom height on distribution. Departmental note, NIAE No. DN/S/777/1925(ej publ).

Nation, H.J. 1976 b. The dynamic behaviour of field sprayer booms: The suite of computer programs. Departmental Note, NIAE No. DN/S/801/09005 (ej publ).

Nation, H.J. 1978 a. Developments in sprayer boom design. Proceedings British Crop Protection Conference-Weeds, Brighton, Nov 1978, 649-656, NIAE.

Nation, H.J. 1978 b. The dynamic behaviour of field sprayer booms: A technique for field measurement. Departmental Note, NIAE No. DN/S/814/09005 (ej publ).

Nation, H.J. 1980. The performance and stability of spray booms. Symposium on Spraying Systems for the 1980's - March 1980, 145-158. NIAE.

Nation, H.J. 1982 a. The Dynamic Behaviour of Field Sprayer Booms. J. agric. Engng Res. 27(1982), 61-70.

Nation, H.J. 1982 b. Application technology: Review and prospects. Proceedings 1982 British Crop Protection Conference - Weeds, NIAE.

Nation, H.J. & Holden, M.R. 1974. The dynamic behaviour of field sprayer booms: The average boom tip performance of 14 sprayers over several operating conditions. Departmental Note, NIAE No. DN/S/537/1905 (ej publ). (Cit Nation & Holden 1975).

Nation, H.J. & Holden, M.R. 1975. The dynamic behaviour of a sprayer boom on a standard bumpy track: Trials of several boom mounting systems. Departmental Note, NIAE No. DN/S739/1905 (ej publ).

Nation, H.J. & Holden, M.R. 1976 a. The dynamic behaviour of field sprayer booms: Accelerations experienced by sprayer booms in work. Departmental Note NIAE No. DN/S/772/1925 (ej publ).

Nation, H.J. & Holden, M.R. 1976 b. The dynamic behaviour of field sprayer booms: The effect of boom stiffness on the relationships between the motion of the sprayer and boom tip movement. Departmental Note, NIAE No. DN/S/773/1925 (ej publ).

Nordby, A. 1977. The influence of nozzle uniformity and the angle of the fan to the boom on spray distribution from booms. 41. Deutsche Pflanzenschutztagung, Münster. (Cit Nordby 1979 a).

Nordby, A. 1979 a, b, c, d, e. Nordisk prosjekt. Utredning og undersøkelser med plantevernstyr. Del 3. Åkersprøyter. Ås-NLH, Landbrugteknisk institutt, Stensiltrykk, Serie A, Nr. 599. a) Væskefordelere, s 31-57. b) Spredébommer, s 60-84. c) Tillstanden og arbeidsevnen til åkersprøyter, s 130-147. d) Fordeling og avsetning av sprøytevæske, s 153-171. e) Avdrift ved åkersprøyting, s 173-191.

Nordby, A & Skuterud, R. 1975. The effect of boom height, working pressure and windspeed on spray drift. Weed Research, Vol 15, p 385-395. (Cit Nordby 1979 a).

- Nilsson, S. 1983. Bandsprutning med små vätskemängder. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för arbetsmetodik och teknik, Rapport 81, 45 s. Uppsala.
- Nyström, P. 1981. Tvåhåls och konventionell spaltspridare. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för arbetsmetodik och teknik, Rapport 70, 25 s. Uppsala.
- Olsson, M. 1983. Centrifugalspridare till lantbrukssprutor. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för arbetsmetodik och teknik. Seminarieuppsats. 20 s. Uppsala.
- Porskamp, H.A.J. 1980. De vloeistofverdeling van landbouwspruten. (The distribution of the spraying liquid of field sprayers). Publikatie, IMAG, (1980): 133, 45.
- Porskamp, H.A.J. 1981. Spuitboombewegingen op de hobbelbaan. Publikatie, IMAG, (1981):153, 40-42.
- Rice, B. 1967. Spray Distribution from Ground-Crop Sprayers. J. agric. Engng Res. 12(1967):3, 173-177.
- Rød, P.O. 1978. Tilstanden og arbeidsevnen til åkersprøyter i praksis. Hovedoppgave, Institutt for maskinlaere, Norges landbrukshøgskole, 59 s.
- Schmidt-Ott, M. 1976. Konstruktive und reglungstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Verteilungsgüte von Pflanzenschutz- und Düngemaschinen. Disseration TU Berlin, 1976, D83.
- Speelman, L. 1973. Die gleichmäßige Verteilung von Spritzbrühen auf unebenem Gelände ist mit den heutigen Spritzbalken- und Düsenkonstruktionen meistens unbefriedigend. Grundlage der Landtechnik, 23(1973):1, 25-27.
- Speelman, L. & Jansen, J.W. 1974. The Effect of Spray-boom Movement on the Liquid Distribution of Field Crop Sprayers. J. agric. Engng Res. 19(1977), 117-129.
- Svensson, K. 1976. Spridare för växtskyddssprutor - en översikt. Ogräs och ogräsbekämpning. 17:e svenska ogräskonferensen. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för arbetsmetodik och teknik. 18 s. Uppsala.
- Tønnesen, A. 1978. Spredebom, arbeidsbrede, kapacitet, tryktab og væskefordeling. NJF Seminar Åkersprøyter og åkersprøyting 1978-10-10--12. LTI, Ås. 1978.
- Wahlström, B. (red). 1972. Bygg. Allmänna grunder, 1 B. Stockholm. A B Byggmästarens förlag.
- Weij, H.G. van der, de Leeuw, J.M. & Speelman, L. 1972. Spuitdopen en vloeistofverdeling. Landbouwmecanisatie, mrt-april, 1972.
- Zaske, J. 1973. Tropfengrößenanalyse unter besonderer Berücksichtigung der Zerstäubung im chemischen Pflanzenschutz, von Fachbereich 15, Technischen Universität, Berlin, 167 p. (Cit Nordby 1979 d).

Bilaga I  
1(5)

A.

Beräkning av reducerat tröghetsmoment  $M_{red}$  för en sprutbom med avtagande masskoncentration, med avseende på avståndet från dess mittpunkt. Se pkt 5.2.4.

För beräkningsexemplet görs följande antaganden:

- Bommen är stumt upphängd i sin mittpunkt.
- Varje del av bommen utsätts för samma vinkelacceleration kring bommens mittpunkt - dvs bommen är antingen av idealt styv konstruktion eller den befinner sig i rotationsrörelse med konstant vinkelacceleration kring en av sina tvärxlar.

På ett godtyckligt element i bommen, med längden  $dx$ , verkar då kraften:

$$dF_x = a_x \cdot dm_x$$

$dF_x$  = den kraft som verkar på elementet  $dx$  (N).

$a_x$  = den acceleration elementet  $dx$  utsätts för ( $m/s^2$ ).

$dm_x$  = elementets massa (kg).

$a_x$  beror av avståndet  $x$  till elementets rotationscentrum samt vinkelaccelerationen  $\omega$  ( $rad/s^2$ ) kring detta enligt:

$$a_x = \omega \cdot x$$

$dm_x$  kan även uttryckas enligt:

$$dm_x = q_x \cdot dx$$

$q_x$  = masskoncentrationen i bommen, som funktion av avståndet  $x$  från dess mittpunkt (kg/m).

$dx$  = elementets längd (m).

Detta ger:

$$dF_x = \omega \cdot q_x \cdot x \cdot dx$$

För en bom med jämnt fördelad massa gäller att:

$$q_x = q_0 = m / L$$

$q_0$  = masskoncentrationen i bommen i dess mittpunkt (kg/m).

$m$  = bommens massa (kg).

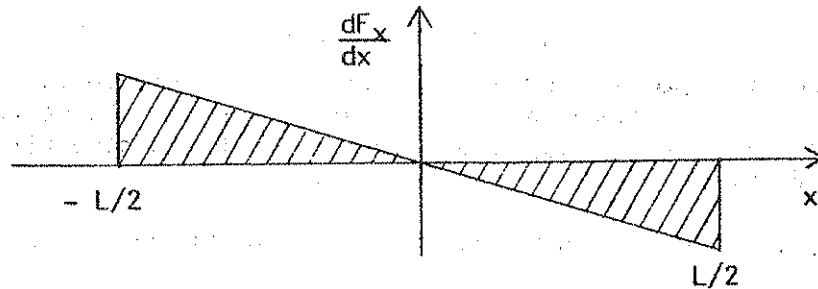
$L$  = bommens totala längd (m).

Ekvationen kan nu skrivas:

$$dF_x = \alpha \cdot q_0 \cdot x \cdot dx$$

Belastningsintensiteten  $dF_x/dx$  (N/m) fördelar sig över bommens längd enligt figur B.1.1. och erhålls enligt:

$$\frac{dF_x}{dx} = \alpha \cdot q_0 \cdot x$$



Figur B.1.1. Belastningsintensitetens fördelning över bommens längd, förutsatt att denna har jämnt fördelad massa.

Den resulterande kraften  $F$  på en bomhalva erhålls genom integrering enligt:

$$F = \alpha \cdot q_0 \int_0^{L/2} x \, dx = \alpha \cdot q_0 \left[ \frac{x^2}{2} \right]_0^{L/2} = \alpha \cdot q_0 \cdot \frac{L^2}{8}$$

Det resulterande vridmomentet kring bommens upphängningspunkt (mitt-), för den på elementet  $dx$  verkande kraften  $dF_x$ , blir:

$$dM_x = dF_x \cdot x$$

Detta ger:

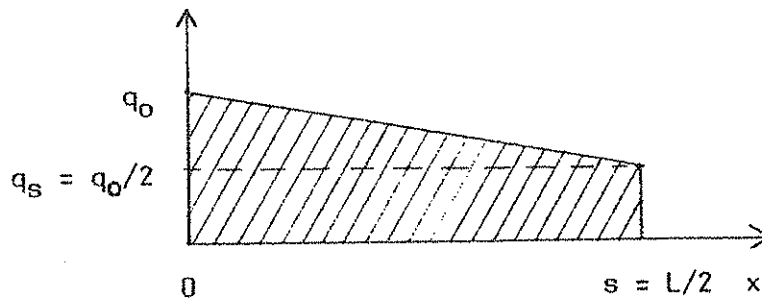
$$M = \alpha \cdot q_0 \int_{-L/2}^{L/2} x^2 \, dx = \alpha \cdot q_0 \left[ \frac{x^3}{3} \right]_{-L/2}^{L/2} = 2 \cdot \alpha \cdot q_0 \cdot \frac{L^3}{24} = \alpha \cdot m \cdot \frac{L^2}{12}$$

Om man låter masskoncentrationen  $q_x$  (kg/m) kontinuerligt reduceras i en bomhalva, från dess upphängningspunkt till dess ände, enligt:

$$q_x = q_0 \left( 1 - \frac{x}{2s} \right)$$

$s$  = bomhalvans längd (m) och motsvarar  $L/2$ .

- blir masskoncentrationen i dess ände  $q_s = q_0/2$ , enligt figur B.1.2.

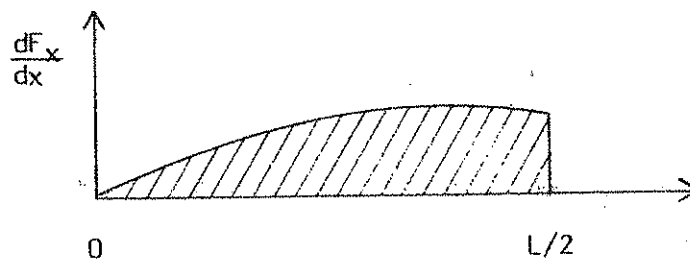


Figur B.1.2. Bomhalva med kontinuerligt reducerad masskoncentration från upphängningspunkt (mitt-) till ände.

Bommens massa blir  $m_{red} = 0,75m$  och ekvationen för kraften  $dF_x$  blir nu:

$$dF_{x \text{ red}} = \alpha \cdot q_0 \left(1 - \frac{x}{2s}\right) x dx = \alpha \cdot q_0 \left(x - \frac{x^2}{2s}\right) dx$$

- och fördelar sig över bomhalvan enligt figur B.1.3. Andra bomhalvan påverkas av motsvarande last, men med motsatt tecken.



Figur B.1.3. Belastningsintensitetens fördelning över en bomhalva med kontinuerligt reducerad masskoncentration.

Den resulterande kraften  $F_{red}$  på bomhalvan blir nu:

$$F_{red} = \alpha \cdot q_0 \int_0^s \left(x - \frac{x^2}{2s}\right) dx = \alpha \cdot q_0 \left[ \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6s} \right]_0^s = \alpha \cdot q_0 \cdot \frac{1}{3} s^2$$

Insättning av  $s = L/2$  ger:

$$F_{red} = \alpha \cdot q_0 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{L^2}{4} = \alpha \cdot q_0 \cdot \frac{L^2}{12}$$



Bilaga 1  
4(5)

Det resulterande vridmomentet på bommen erhålls nu genom integrering av följande uttryck:

$$dM_{x \text{ red}} = dF_{x \text{ red}} \cdot x$$

- vilket ger:

$$M_{\text{red}} = \alpha \cdot q_0 \int_{-s}^s x \left( x - \frac{x^2}{2s} \right) dx = \alpha \cdot q_0 \left[ \frac{x^3}{3} - \frac{x^3}{6s} \right]_{-s}^s = \alpha \cdot q_0 \cdot \frac{5}{12} s^3$$

Insättning av  $s = L/2$  ger:

$$M_{\text{red}} = \alpha \cdot q_0 \cdot \frac{5}{96} L^3 = \alpha \cdot m \cdot \frac{5}{96} L^2$$

Förhållandet mellan  $M_{\text{red}}$  och  $M$  kan nu beräknas:

$$\frac{M_{\text{red}}}{M} = \frac{5L^2}{96} \cdot \frac{12}{L^2} = 0,625$$

B.

Beräkning av fältmomentets fördelning i en bom med jämnt fördelad massa, dvs  $q_x = q_0 = m/L$ .

Lastintensiteten  $dF_x/dx$  (N/m) fördelas över bommens längd enligt figur B.1.1.

Fältmomentet  $M_x$  i punkten  $x$  beräknas med utgångspunkt i figur B.1.4.

Momentet från hela ytan  $M_{x \text{ hy}}$ :

$$M_{x \text{ hy}} = \alpha \cdot q_0 \cdot s(s-x) \cdot \left( \frac{s-x}{2} \right) = \alpha \cdot q_0 \cdot s \cdot \frac{(s-x)^2}{2}$$

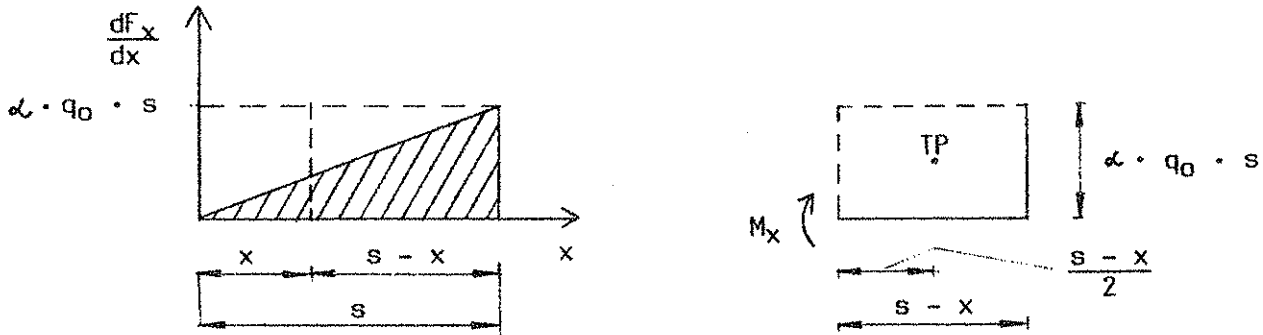
Momentet från övre triangeln  $M_{x \text{ öt}}$ :

$$M_{x \text{ öt}} = \frac{\alpha \cdot q_0 \cdot s \cdot \left( \frac{s-x}{x} \right) \cdot (s-x)}{2} \cdot \left( \frac{s-x}{3} \right) = \alpha \cdot q_0 \cdot s \cdot \frac{(s-x)^3}{6s}$$

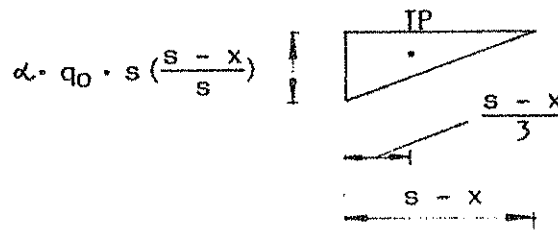
Detta ger fältmomentet  $M_x$  enligt:

$$M_x = M_{x \text{ hy}} - M_{x \text{ öt}} = \alpha \cdot q_0 \cdot s \left( \frac{(s-x)^2}{2} - \frac{(s-x)^3}{6s} \right)$$

Fältmomentets fördelning över en bomhalva visas i figur B.1.5.

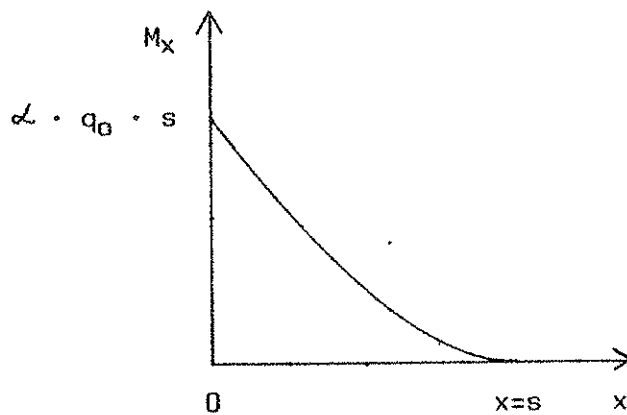


a. Belastningsintensitetens fördelning.    b. hela ytan



c. övre triangeln

Figur B.1.4. Beräkning av fältmoment. TP = tyngdpunkt.



Figur B.1.5. Fältmomentets fördelning över en bomhalva med jämnt fördelad massa.

Bilaga 2  
1(2)

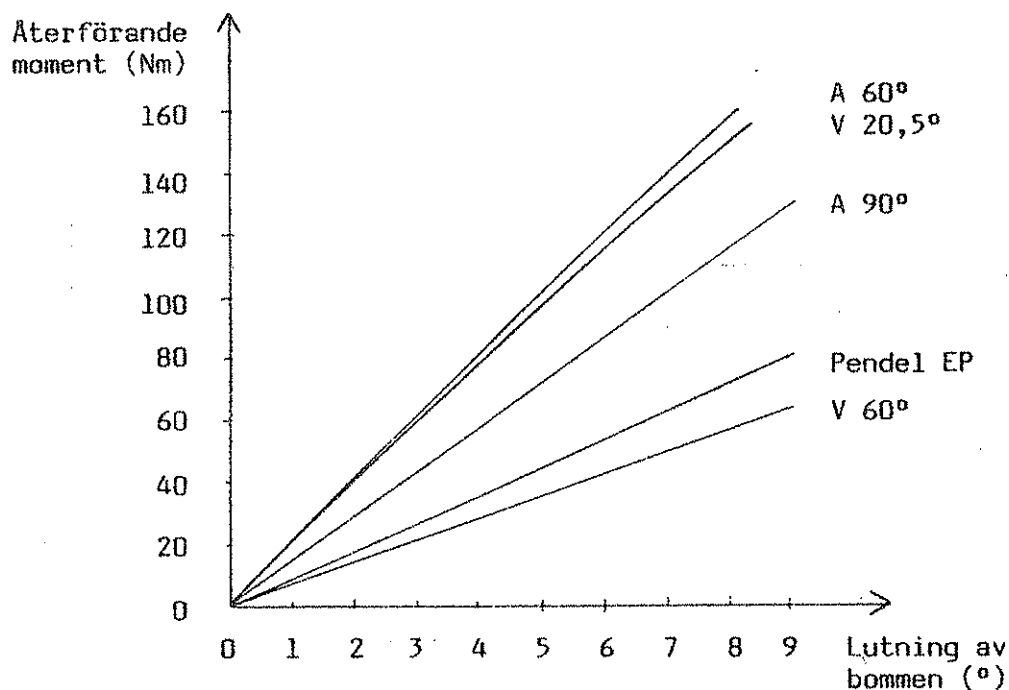
Grafisk beräkning av det återförande momentets storleksförändring hos några olika trapetsupphängningar (se pkt 5.2.5.1.).

För identifiering av upphängningarna används beteckningarna A 60°, V 60° etc. Bokstaven anger upphängningens form och siffrorna anger vinkeln mellan förlängningarna av länkarmarnas längdaxlar i punkten VP. Bomstativet förutsätts i detta läge stå vertikalt och bommen befinna sig horisontalt, i sitt jämviktsläge.

Det återförande momentet har beräknats för olika lutningar av bommen i förhållande till stativet, som förutsattes behålla sitt vertikala läge. Momentarmens längd- och lutningsändringar mättes och beräknades. Bommens tyngd förutsattes vara 1000 N. Dess tyngdpunkt TP förutsattes sammanfalla med tyngdkraftens angreppspunkt TA, vilket normalt innebär en approximering av ett verkligt förhållande. Mätningarna har utförts på figurer i skala 1:5, dvs basen i en A 60°-trapets var 120 mm (fig B.2.2.).

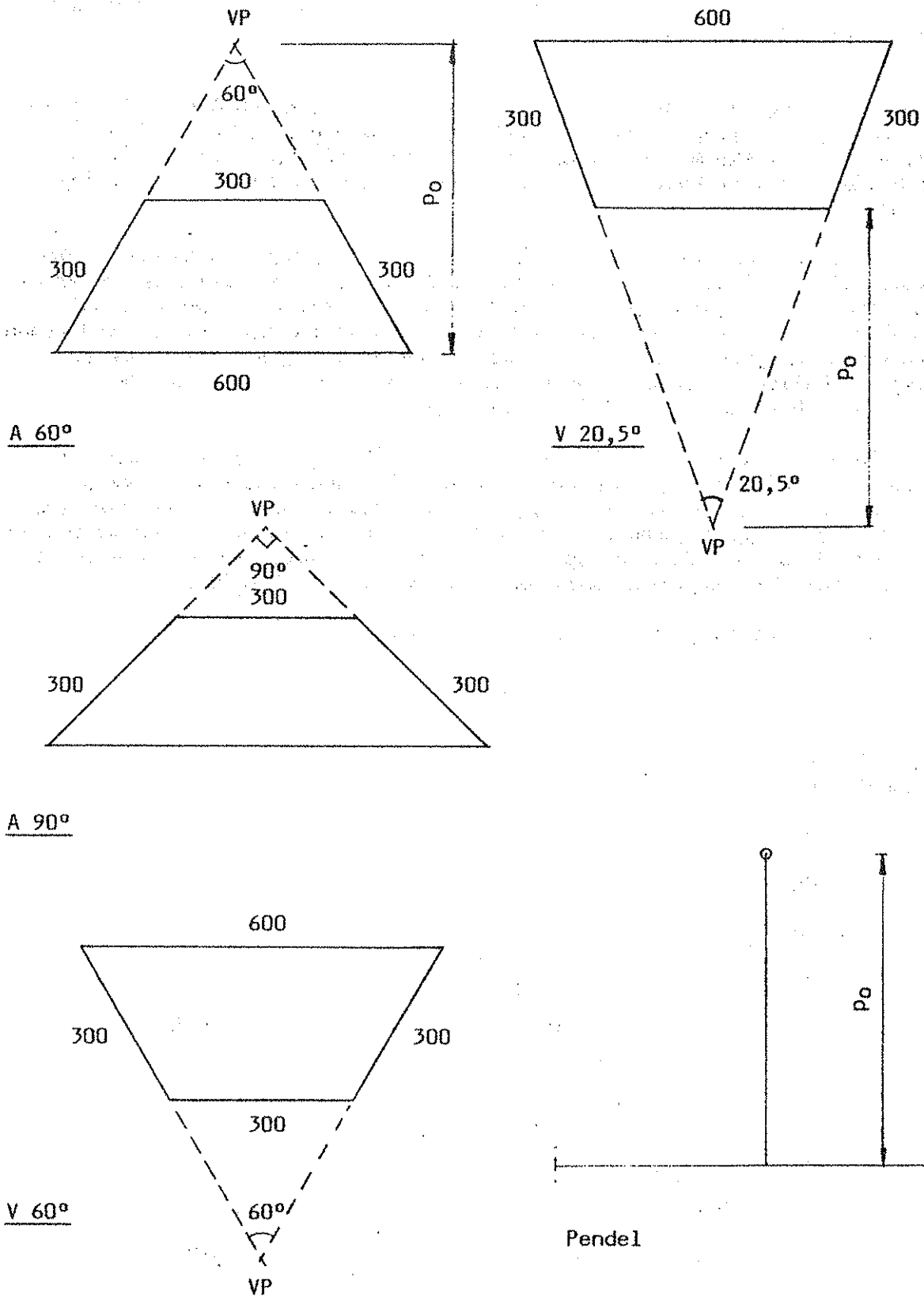
Upphängningarna A 60° och V 60° har identiska mått, men med skillnaden att trapetsen i V 60° har vänts upp och ned. För att kunna jämföra effekten av olika långa nominella momentarmar  $p_0$ , har även momentkurvor för upphängningarna A 90° och V 20,5° beräknats.  $p_0$  i V 20,5° har valts så att den motsvarar  $p_0$  i A 60°. Dessa momentkurvor kan jämföras med momentkurvan för en enpunktsupphängd pendel EP, vars pendelarm är lika lång som  $p_0$  i A 60°.

Resultatet av beräkningarna återges i figur B.2.1.



Figur B.2.1. Det återförande momentet som funktion av bommens lutning för några olika trapetsupphängningar.

Bilaga 2  
2(2)



Figur B.2.2. Upphängningar för vilka grafiska beräkningar har utförts.  
Mått i mm.

Bilaga 3  
1(3)

Modellförsök med trapetsupphängningar.

En modell av ett bomstativ med upphängningsanordning och bom byggdes med delar ur en Mekanolåda (fig B.3.1.). I modellen kunde trapetsupphängningar av olika geometrier byggas.

Länkarmarna bestod av tunna stänger ("plattjärn") med fem hål. Deras effektiva längd var fyra längdenheter, där en längdenhet motsvarades av centrumavståndet mellan två hål. I samtliga försök användes denna länkarmslängd.

Geometri och mått för en trapetskonstruktion anges med t ex beteckningen A 4/8. Denna innebär att upphängningen är uppbyggd i A-form och att avståndet mellan länkarmarnas övre respektive undre lagringspunkter är fyra respektive åtta längdenheter. A 4/10/4/10, betecknar en dubbelltrapets av A-form där trapetsernas övre respektive undre mått är fyra respektive tio längdenheter.

Med modellen undersöktes bommens resulterande lutningar mot horisontalplanet för olika lutningar av stativet (fig B.3.2.). Trapetsupphängningar av A-form visade sig inta lutningar som understeg stativets lutning, medan upphängningar av V-form överdrev dess lutning.

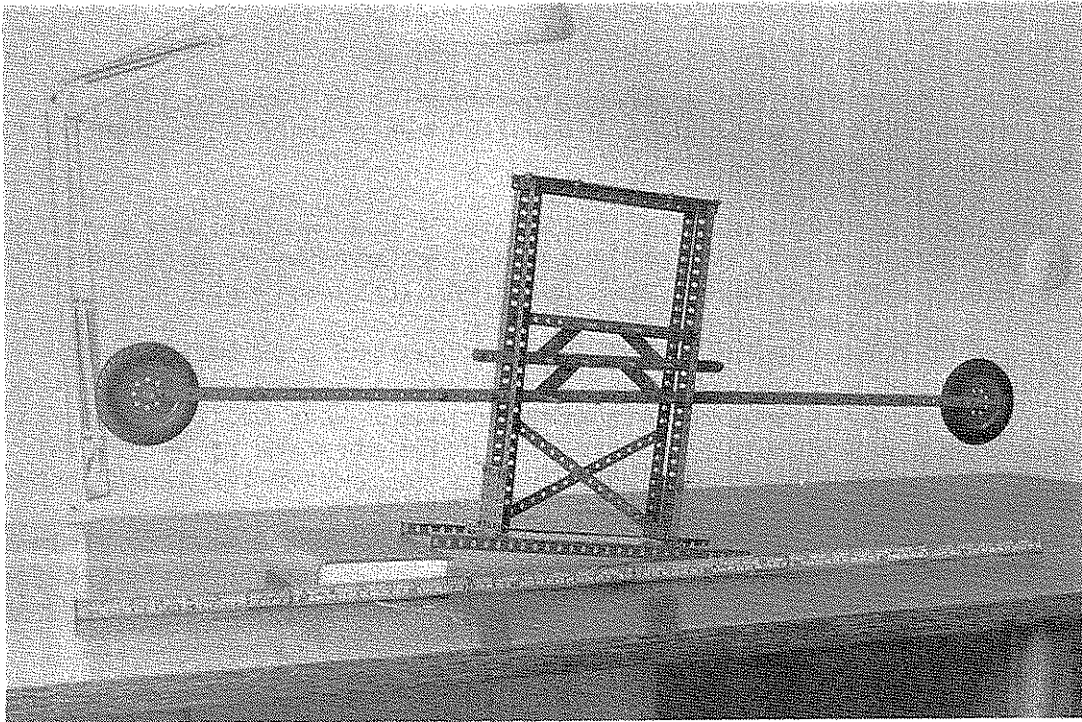
Med modellen undersöktes även storleken av det återförande momentet på bommen för olika upphängningar samt resulterande lutningar av bommen för givna belastningar (tab B.3.1.). Först lutades stativet  $5^\circ$  och bommen belastades i sin övre ände med vikter (brickor) tills den återintog horisontalt läge. Därefter mättes bommens vinkelutslag för de uppmätta belastningarna men med stativet i vertikalt läge.

Av resultaten framgår att upphängningar av A-form uppvisar mindre vinkelutslag än de av V-form för samma belastning, förutsatt att upphängningarna i övrigt har identiska mått. Detta åskådliggör förhållandet att A-formen har längre nominell pendelarm än V-formen.

Försöken visade även att det, för A- och V-upphängningar med identiska mått, krävs lika stor belastning för att föra bommen tillbaka till horisontalt läge vid lutning av stativet.

Upphängningar av V-form uppvisade lugnare bomrörelser då stativet utsattes för vridningsrörelser i bommens längdplan. Även detta bevisar att bommen utsätts för ett mindre återförande moment i denna upphängningsform på grund av kortare nominell pendelarm om ovanstående förutsättningar gäller.

Dubbelltrapetserna visade sig ge bommen betydligt lugnare rörelser än enkeltrapetserna. Relativt bommen rörde sig däremot det mellanhängande oket ganska mycket. Bommen utförde även mindre sidorörelser i förhållande till stativet i denna upphängningsform.

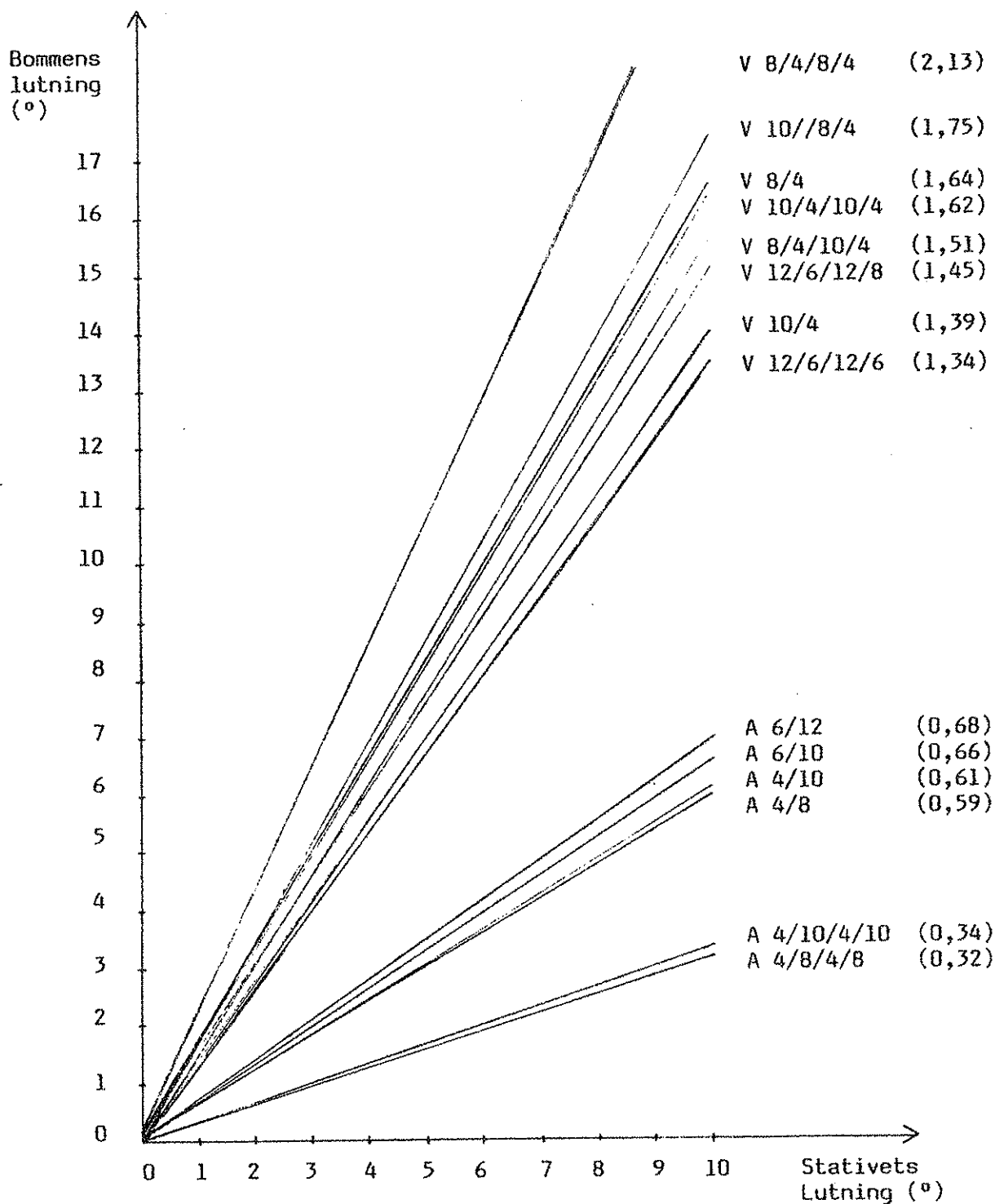


Figur B.3.1. Försöksmodell byggd med delar ur en Mekanolåda.

Tabell B.3.1. Bommens vinkelutslag vid belastning med tyngd i dess ena ände och stativet i vertikalt läge. Belastningen är den som erfordrades för att få bommen att återintä sitt horisontala läge efter stativet hade lutats  $5^\circ$ .

Upphängningsmodell	Belastning (antal brickor)	Vinkelutslag ( $^\circ$ )
A 4/8	7	2,9
V 8/4	6,5	8,2
A 4/10	5	3,0
V 10/4	5	6,9
A 4/8/4/8	3	1,7
V 8/4/8/4	3	9,6
A 4/10/4/10	2,25	1,9
V 10/4/10/4	2,5	6,4
A 4/8/4/10	2,5	1,6
A 4/10/4/8	3	2,0
V 8/4/10/4	3,5	9,7
V 10/4/8/4	2,5	8,5
V 12/6/12/6	4,5	6,9

Bilaga 3  
3(3)



Figur B.3.2. Bommens lutning som funktion av stativets lutning.  
Siffrorna inom parentes anger lutningskoefficienten.

**SIMULATEUR DE MOUVEMENTS  
POUR RAMPES DE PULVERISATION  
POUR CULTURES BASSES**

---

La qualité du travail des rampes de pulvérisation pour cultures basses est soumise à de nombreux aléas qui rendent leur appréciation objective délicate.

Les constructeurs et les utilisateurs pourront bientôt disposer d'un équipement de contrôle de la qualité de ce travail en simulation de fonctionnement.

Cet équipement est composé d'un simulateur contrôlé électroniquement qui reproduit fidèlement les mouvements de la machine sur le terrain; des machines complètes seront installées sur ce simulateur.

Les données sont recueillies sur des bancs de répartition pour la pulvérisation, et des capteurs d'efforts ou d'accélération placés en divers points de l'installation pour l'étude des composants mécaniques.

Les essais autorisés par ce dispositif permettront aux ingénieurs de mieux concevoir les machines afin d'augmenter leurs performances et leur productivité.