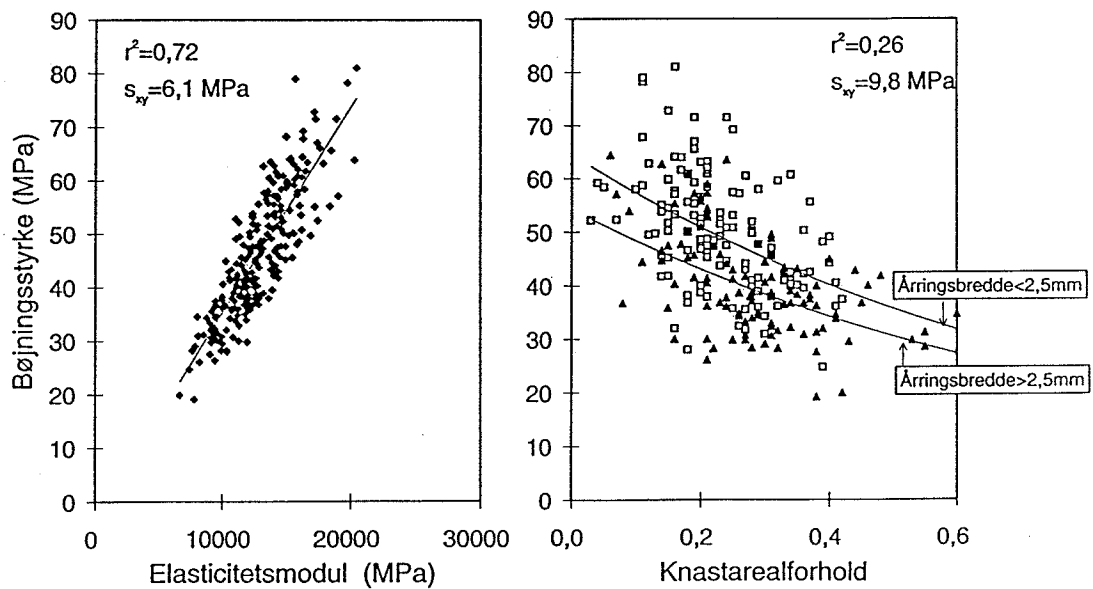


# Styrkesortering ger mervärde

## Del 2 - Tilgængelig teknik

Preben Hoffmeyer



Titelbladets figur er udarbejdet på grundlag  
af data fra Johansson et al. 1992

# Forord

Nordisk Industrifond satser i perioden 1993-1996 på FoU indenfor den nordiske træindustri. Dette sker indenfor rammerne af et særligt program med titlen *Nordic Wood*, hvis formål er at forøge det nordiske konstruktionstræs konkurrenceevne overfor andre bygningsmaterialer.

Et af projekterne indenfor *Nordic Wood*-programmet er *Styrkesortering ger mervärde*. Projektet har til formål at skabe forudsætningerne for maskinel styrkesortering af nordisk konstruktionstræ med højest mulige udbytte og lønsomhed. Projektet er gennemført i perioden 1994.10.01-1995.03.31 og det foreligger rapporteret i følgende tre dele:

- Del 1: Markedsundersøgelse
- Del 2: Tilgængelig teknik
- Del 3: Krav til fremtidens sorteringsmaskiner

Denne rapport omhandler del 2, "tilgængelig teknik".

Projektet er finansieret af nordisk træindustri med 50%, Nordisk Industrifond med 30% og nationale organer (Erhvervsfremme Styrelsen, NORWOOD, NUTEK och TEKES) med 20%.

Projektet er gennemført ved Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Norsk Treteknisk Institutt (NTI), Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut (SP), Statens Tekniska Forskningscentral (VTT) och Träteck. Ansvarlige for arbejdet har været en projektgruppe med følgende sammensætning:

|                      |                  |                  |     |
|----------------------|------------------|------------------|-----|
| Carl-Johan Johansson | SP, projektleder | Mikael Fonselius | VTT |
| Erik Aasheim         | NTI              | Preben Hoffmeyer | DTU |
| Lars Boström         | SP               | Urho Saarelainen | VTT |
| Jan Brundin          | Träteck          | Kjell Solli      | NTI |

Projektets styregruppe har haft følgende medlemmer:

|               |                                |
|---------------|--------------------------------|
| Jan Hagstedt  | Nordic Timber Council, formand |
| Oluf Hansen   | Danske Træindustrier           |
| Ingmar Moland | Begna Bruk A/S                 |
| Jorma Sainio  | United Sawmills Ltd            |

Rapporten er redigeret af Preben Hoffmeyer, DTU med bistand fra personer som nedenfor anført. Her skal især nævnes Carl-Johan Johansson's bidrag som koordinator, Kjell Helge Solli's bidrag til kapitel 3 og Lars Boström's udarbejdelse af kapitlerne 4 og 5. Bidrag til rapporten er leveret af:

|           |                                                                                                                                                                                                |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kapitel 1 | P. Hoffmeyer                                                                                                                                                                                   |
| Kapitel 2 | P. Hoffmeyer, N. Morsing                                                                                                                                                                       |
| Kapitel 3 | L. Boström (3.1), K.H. Solli (3.2, 3.7, 3.10), T. Schmidt (3.3, 3.10), P. Hoffmeyer (3.4), M. Perstorper (3.5, 3.6), W. Han (3.5, 3.6, 3.8, 3.10), J. Kielland-Lund (3.7), A. Samuelsson (3.9) |
| Kapitel 4 | Lars Boström                                                                                                                                                                                   |
| Kapitel 5 | Lars Boström                                                                                                                                                                                   |
| Kapitel 6 | Preben Hoffmeyer                                                                                                                                                                               |

# Indholdsfortegnelse

Side

## Forord

|       |                                                                                                               |           |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1     | Indledning.....                                                                                               | 1         |
| 2     | Grundlaget for styrkesortering.....                                                                           | 3         |
| 2.1   | Indledning.....                                                                                               | 3         |
| 2.2   | Den statistiske analyse.....                                                                                  | 3         |
| 2.2.1 | <i>Regressions- og korrelationsanalyse.....</i>                                                               | <i>3</i>  |
| 2.2.2 | <i>Sorteringskvalitetens betydning for den karakteristiske styrke og for udfaldet i en styrkeklasse.....</i>  | <i>5</i>  |
| 2.3   | Sammenhæng mellem styrke/stivhed og de ikke-destruktive parametre .....                                       | 9         |
| 2.3.1 | <i>Bøjningsstyrke .....</i>                                                                                   | <i>9</i>  |
| 2.3.2 | <i>Trækstyrken .....</i>                                                                                      | <i>13</i> |
| 2.3.3 | <i>Stivhed (elasticitetsmodul).....</i>                                                                       | <i>13</i> |
| 2.4   | Andre faktorer, der kan påvirke sammenhængen mellem styrkeegenskaberne og de ikke-destruktive parametre ..... | 14        |
| 2.4.1 | <i>Højde i træet.....</i>                                                                                     | <i>14</i> |
| 2.4.2 | <i>Dimension.....</i>                                                                                         | <i>14</i> |
| 2.4.3 | <i>Træart.....</i>                                                                                            | <i>15</i> |
| 2.4.4 | <i>Ungdomsved .....</i>                                                                                       | <i>15</i> |
| 2.4.5 | <i>Sammenhængen mellem elasticitetsmodulen på smalsiden og på breidsiden .....</i>                            | <i>15</i> |
| 2.5   | Udbytte som funktion af sorteringssystemernes kvalitet.....                                                   | 17        |
| 2.6   | Konklusion .....                                                                                              | 19        |
| 2.7   | Litteratur .....                                                                                              | 21        |
| 3     | Registrering av fysiske parametere og nye bruksområder for kjente prinsipper.....                             | 24        |
| 3.1   | Böjstyvhet.....                                                                                               | 25        |
| 3.2   | Sannsynlig variasjon av registrert stivhet ved bøyebaserte styrkesorteringsmaskiner .....                     | 29        |
| 3.3   | Optisk detektering av kvistar och andra karakteristika på sågade eller hyvlade träytor.....                   | 36        |
| 3.4   | Nær-inrarød refleksjonsspektroskopis anvendelse ved styrkesortering.....                                      | 41        |
| 3.5   | Elasticitetsmodul från resonanta vibrationer som sorteringsparameter.....                                     | 47        |
| 3.6   | Våtutbredningshastighed från ultraljudprovning som sorteringsparameter .....                                  | 54        |
| 3.7   | Gjennomlysningsteknikker .....                                                                                | 63        |
| 3.8   | Neurale nett som metode for databehandling i forbindelse med styrkesortering .....                            | 69        |

|      |                                                 |     |
|------|-------------------------------------------------|-----|
| 3.9  | Fuktkvotsmätning i löpande produktion .....     | 74  |
| 3.10 | Dekonvolusjonsteknikk for styrkesortering ..... | 76  |
| 4    | Maskiner på marknaden .....                     | 78  |
| 4.1  | Inledning .....                                 | 78  |
| 4.2  | Computermatic .....                             | 79  |
| 4.3  | Tecmach (fd Cook-Bolinder) .....                | 80  |
| 4.4  | EuroGreComat .....                              | 82  |
| 4.5  | RauteTimgrader .....                            | 84  |
| 4.6  | Metriguard CLT and Model 7200 .....             | 85  |
| 4.7  | Dart (Eldeco) .....                             | 86  |
| 4.8  | TRU Timber Grader .....                         | 87  |
| 4.9  | Finnograder .....                               | 88  |
| 4.10 | Sylvatest .....                                 | 90  |
| 4.12 | Proof Testing .....                             | 92  |
| 4.13 | Sammanfattning .....                            | 93  |
| 4.14 | Referenser .....                                | 94  |
| 5    | Nya sorteringmaskiner - prototyper .....        | 96  |
| 5.1  | Ersson Stress Grader .....                      | 96  |
| 5.2  | BAS .....                                       | 96  |
| 5.3  | Micro-vågsteknik .....                          | 98  |
| 5.4  | Ulvins styrkesorteringsmaskin .....             | 98  |
| 5.5  | Referenser .....                                | 99  |
| 6    | Konklusion .....                                | 100 |
| 6.1  | Styrkesorteringens baggrund .....               | 100 |
| 6.2  | Sorteringsprinsipper .....                      | 102 |
| 6.3  | Styrkesorteringsmaskiner .....                  | 105 |



# 1 Indledning

## Generelt

Alt træ til bærende konstruktioner skal være styrkesorteret. Dette grundlæggende krav er på samme tid både en økonomisk ulempe og en økonomisk fordel. Det er en ulempe, fordi såvel visuel- som maskinel styrkesortering er forbundet med omkostninger. Det er dog samtidigt en fordel, idet styrkesortering giver mulighed for en dramatisk opgradering af konstruktionstræs kvalitet.

Den høje kvalitet af nordisk konstruktionstræ udnyttes i altfor ringe grad i byggeriet. Dette har bl.a. sin baggrund i en utilstrækkelig kvalitet af de anvendte styrkesorteringssystemer. Af typisk nordisk konstruktionstræ med en middelbøjningsstyrke på 45 Mpa og en variationskoefficient på 25% burde der med et effektivt styrkesorteringssystem kunne produceres udfald af C24, C30 og C40 på henholdsvis 10-20%, 50-60% og 30-40%. Selv af nordisk konstruktionstræ af relativ ringe kvalitet med middelbøjningsstyrke på 35 Mpa og en variationskoefficient på 30% burde der kunne produceres 30-40% af kvaliteten C30. Med den nuværende kvalitet af de visuelle og maskinelle systemer opnås i praksis langt lavere sorterings udbytter, hvilket alvorligt svækker konkurrencekraften for træ som bygningsmateriale. Formålet med nærværende projekt er at identificere kravene til fremtidens styrkesorteringsmaskiner med henblik på etablering af en basis for igangsættelsen af efterfølgende mere omfattende forsknings- og udviklingsprojekter indenfor styrkesortering.

Da mange af kravene til styrkesortering i fremtiden vil være en integreret del af den europæiske trænorm, er der behov for en kort introduktion til dette systems håndtering af styrkesortering.

## Det europæiske system

Med den kommende europæiske trænorm EC5 [ENV 1995-1-1] indføres et fælles europæisk system til sikring af konstruktionstræs egenskaber. I EN 338 defineres et antal styrkeklasser, hvortil alt træ til bærende konstruktioner skal henregnes. Styrkeklasserne definerer de sammenhørende værdier af mekaniske egenskaber, som arkitekter og ingeniører skal anvende ved dimensionering af trækonstruktioner. Styrkeklasserne er C14, C16, C18, C22, C24, C27, C30, C35 og C40, hvor talværdierne refererer til den karakteristiske bøjningsstyrke<sup>1</sup> for den pågældende klasse.

Adgangen til en styrkeklasse sker via *en obligatorisk maskinel eller visuel styrkesortering*, som skal sikre, at konstruktionstræets karakteristiske værdier opfylder de minimumskrav, som stilles til den pågældende styrkeklasse.

Som optakt til det kommende europæiske system er der i de nordiske lande gennemført en harmonisering af nationale visuelle styrkesorteringsregler, idet det har vist sig, at de sorteringsregler, som idag anvendes, er forskellige i de nordiske lande. Der er

---

<sup>1</sup> Karakteristisk styrke af konstruktionstræ er defineret som den styrke, hvorunder kun 5% af alle styrkeværdier ligger (5% procent fraktilen)

derfor nu udarbejdet en fælles nordisk standard for visuel styrkesortering [INSTA 142], som forventes at træde i kraft i efteråret 1995.

Der findes ikke nogen egentlig fælles europæisk visuel styrkesorteringsstandard. Der findes dog en standard [EN 518], som definerer de grundlæggende krav for, hvorledes en visuel styrkesorteringsstandard skal udformes. Heri er INSTA 142 anført som én af de standarder, der opfylder de grundlæggende krav, og INSTA standarden er således anerkendt til anvendelse i europæisk sammenhæng. Det påvirker derefter de nordiske lande at føre det tekniske bevis for, at INSTA 142 reglerne sikrer opfyldelsen af adgangskravene til de relevante EC5 styrkeklasser. Dette er nu sket i forbindelse med udarbejdelsen af et standardforslag [EN.TC124.215], hvori de vigtigste europæiske visuelle sorteringsklasser er blevet indplaceret i styrkeklasser. De fire nordiske klasser T0, T1, T2 og T3 [INSTA 142] er placeret i henholdsvis C14, C18, C24 og C30<sup>2</sup>.

Maskinel styrkesortering er i europæisk sammenhæng styret af EN 519, som definerer krav til styrkesorteringsmaskiner samt af EN.TC124.216, som giver retningslinier for maskinindstillingsværdier. Maskinsortering er i princippet istand til at producere konstruktionstræ til hvilken som helst af de 9 styrkeklasser. Samtidig er det alene maskinsortering, der kan producere konstruktionstræ til de to højeste klasser C35 og C40.

### **Dette projekt**

Det primære formål med dette projekt er udarbejdelsen af krav til fremtidige metoder til styrkesortering af konstruktionstræ. Projektet er opdelt i tre delprojekter:

- DEL 1: Træindustriens behov (spørgeundersøgelse)
- DEL 2: Tilgængelig teknik
- DEL 3: Krav til fremtidige sorteringsmetoder

Denne rapport omhandler DEL 2.

### **Litteratur**

EN 338: Structural Timber - Strength classes

EN 519: Structural Timber - Grading - Requirements for machine strength graded timber and grading machines

EN 518: Structural Timber - Grading. Requirements for visual strength grading systems

EN.TD124.215 - Structural Timber - Strength classes - Assignments of visual grades and species

EN.TC124.216 - Structural Timber - Strength grading machine settings

ENV 1995-1-1: Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings

INSTA 142: Nordic visual grading rules for timber

---

<sup>2</sup> Limtræsorteringsklasserne LT20 og LT30, hvis sorteringskriterier ligger tæt op ad kriterierne for T1 og T2, er foreslået indplaceret i klasserne C18 og C24

## 2 Grundlaget for styrkesortering

### 2.1 Indledning

Formålet med dette kapitel er at give grundlaget for bedømmelsen af visuelle og maskinelle styrkesorteringssystemers kvalitet. Der foretages en vurdering af de ikke-destruktive parametres anvendelighed som styrkesorteringskriterium. Derudover omtales de faktorer, der påvirker sammenhængen mellem styrkeegenskaberne og de ikke-destruktive parametre. Træart, plankens placering i stammen, dimensionen og andelen af ungdomsved vil eksempelvis indvirke på denne sammenhæng, og dermed påvirke udfaldet ved en styrkesortering. Der gives i kapitlet en introduktion til det statistiske værktøj, der anvendes ved bedømmelse af en sorteringsmetodes kvalitet.

Ved styrkesortering af konstruktionstræ tages hensyn til flest muligt af de egenskaber, som erfaringsmæssigt vides at have betydning for styrken. I hvilket omfang, de enkelte parametre influerer på styrken, er det imidlertid vanskeligt at vurdere, idet disse faktorer samvirker indbyrdes. Statistiske værktøjer som regressionsanalyse og korrelationsanalyse kan her anskueliggøre betydningen af sorteringsparametrene, enkeltvis og i kombination med andre.

Skønt styrkesortering har været praktiseret i Skandinavien i de seneste 30 år, savnes stadig systematiske undersøgelser af sammenhængene mellem styrkeegenskaber og de ikke-destruktive parametre. I det følgende anvendes hovedsageligt resultaterne fra de få, større undersøgelser af gran (*Picea abies*), hvori der indgår statistiske analyser. Typisk for disse undersøgelser er det imidlertid, at udvælgelsen af materialet ikke primært er sket med henblik på bedømmelse af styrkesorteringsreglers kvalitet. En detaljeret analyse af sammenhængen mellem styrken og de ikke-destruktive parametre vanskeliggøres endvidere af, at de tilgængelige undersøgelser ofte er meget forskellige hvad angår forsøgsmateriale og forsøgsmetoder. Det er eksempelvis ofte forekommende, at metoderne til fastlæggelse af knastkriterierne er vidt forskellige. Endvidere er metoden til måling af styrken eller stivheden ofte forskellig, styrken eller stivheden er ikke henført til samme fugtindhold, undersøgelserne er udført med forskellige dimensioner, forskellige træarter er anvendt, etc.

### 2.2 Den statistiske analyse

Styrkesorteringens grundlag er eksistensen af en statistisk sammenhæng mellem styrken og de ikke-destruktive parametre. Denne sammenhæng udtrykkes ved nogle simple, statistiske størrelser, som det er nødvendigt at have kendskab til for at få det fulde udbytte af det efterfølgende. *Læsere, der på forhånd har kendskab til disse metoder, kan gå direkte til afsnit 2.2.2*

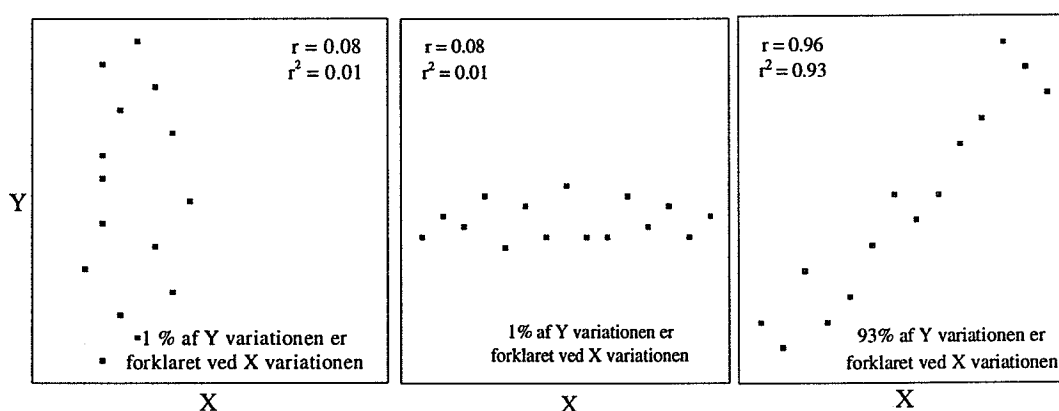
#### 2.2.1 Regressions- og korrelationsanalyse

Den simple lineære regressionsmodel udgør det formelle grundlag for en analyse af sammenhængen mellem en responsvariabel (eks. styrke) og en forklarende variabel (eks. knastmål, årringsbredde, stivhed etc.). Resultatet af en simpel lineær regressionsanalyse vil typisk være en regressionsmodel af formen:

$$Y = a + bX + e \quad (1)$$

hvor  $Y$  er responsvariablen (f.eks styrken) og  $X$  er den forklarende variabel (f.eks knastørrelse).  $a$  og  $b$  er konstanter, der udtrykker henholdsvis skæringen med  $y$ -aksen og hældningen på regressionslinien (Figur 2.2). Den lineære komponent  $a + bX$  beskriver midelværdien af responsvariablen som funktion af den forklarende variabel, mens  $e$  beskriver den tilbageværende afvigelse (residualafvigelsen), der anses for at være normalfordelt  $N(0, \sigma^2)$ . Den simple lineære regressionsanalyse kan udvides ved inddragelse af flere forklarende variable, og der tales da om en multipel regressionsanalyse.

Bedømmelsen af en regressionsmodels kvalitet sker traditionelt ved angivelse af den såkaldte korrelationskoefficient. Korrelationskoefficienten angiver et mål for, hvor godt den estimerede model er i stand til at beskrive materialet. Resultatet af en korrelationsanalyse er ét tal, korrelationskoefficienten,  $r$ . Korrelationskoefficienten ligger i intervallet  $-1 < r < 1$ . Betydningen af  $r$  er illustreret i Figur 2.1. Hvis  $r = \pm 1$ , er der tale om en perfekt lineær sammenhæng. Den nedre grænse viser, at de to parametre er negativt korreleret, dvs den lineære sammenhæng har en faldende tendens. Den øvre grænse udtrykker en positiv korrelation, dvs den lineære sammenhæng har en stigende tendens. Hvis  $r = 0$  er der ingen lineær statistisk sammenhæng indeholdt i observationerne.

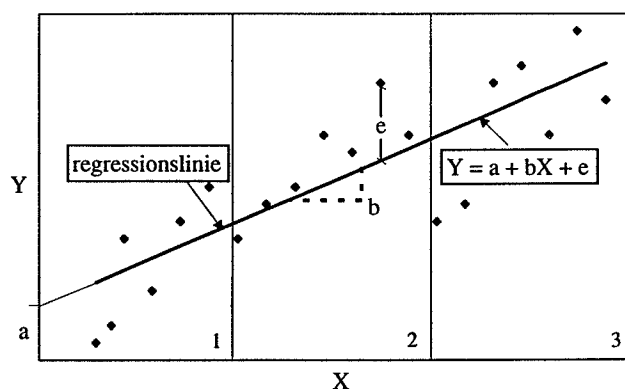


Figur 2.1. Eksempler på god og dårlig korrelation for sammenhæng mellem  $Y$  (f.eks styrke) og  $X$  (f.eks densitet).

Kvadratet af korrelationskoefficienten,  $r^2$ , omtales ofte som forklaringskoefficienten eller forklaringskoefficienten. Forklaringskoefficienten kan fortolkes som den andel af den totale variation i  $Y$ , der kan forklares ved en lineær funktion af  $X$ . Forklaringskoefficienten ligger i intervallet,  $0 < r^2 < 1$ . Den nedre grænse udtrykker, at den forklarende parameter,  $X$ , ikke har nogen indflydelse på responsvariablen, mens den øvre grænse udtrykker, at hele variationen i responsvariablen,  $Y$ , er forklaret ved  $X$ . En  $r^2$ -værdi på 0,60 betyder eksempelvis, at 60% af variationen i styrkeparameteren er forklaret ved variationen i sorteringsparameteren.

Fortolkningen af forklaringskoefficienten (og korrelationskoefficienten) skal ske med omtanke, idet  $r^2$  afhænger af variationsintervallet for såvel  $X$  som  $Y$ . Figur 2.2 viser en situation, hvor den forventede værdi af responsvariablen  $Y$  er en lineær funktion af den forklarende variabel  $X$ . Tre

delsituationer betragtes: I den første benyttes hele materialet (1+2+3), i den anden benyttes data fra midterste sektion (2) og i den tredje benyttes data fra de to ydersektioner (1+3) til beregning af  $r^2$ . Betegnes de beregnede forklaringskoefficienter med henholdsvis  $r_1^2$ ,  $r_2^2$ ,  $r_3^2$  findes, at  $r_2^2 < r_1^2 < r_3^2$ . Den kendsgerning, at man opnår samme lineære relation mellem X og Y, men at forholdet



Figur 2.2 Variationsintervallets betydning for  $r^2$

mellem variationen omkring regressionslinien i forhold til variationen i X er forskelligt i de 3 situationer er meget vigtigt. Det betyder, at kvaliteten af en regressionsanalyse bør bedømmes ikke blot ved angivelse af  $r^2$ , men tillige bør ledsages af standardafvigelsen,  $s_{xy}$ , omkring regressionslinien.

To vigtige konklusioner kan drages på baggrund af Figur 2.2:

- Hvis variationsintervallet for X er lille, er det meningsløst at udføre en regressionsanalyse.
- Regressionsanalysen er kun gældende indenfor variationsintervallet for X. Ekstrapolation bør ske med stor varsomhed.

I nærværende kapitel vil forklaringskoefficienten,  $r^2$ , hovedsageligt blive anvendt, da betydningen af denne størrelse er umiddelbart forståelig. Den udtrykker direkte, hvor stor en brøkdelen af variationen i Y, der kan forklares ved X.

## 2.2.2 Sorteringskvalitetens betydning for den karakteristiske styrke og for udfaldet i en styrkeklasse

Styrkesortering af konstruktionstræ skal naturligvis medvirke til at sikre, at styrken af en konstruktion er højere end den belastning, som den kan forventes udsat for. Den afgørende parameter ved styrkeberegninger er den karakteristiske styrke. Denne defineres som den nedre 5%-fraktil for en given styrkeklasse, dvs den værdi, 95% af de observerede styrkeværdier overstiger. Middelværdien for styrken af en given styrkeklasse er altså ikke alene afgørende for indplaceringen i et styrkeklasesystem.

Den karakteristiske styrke (5%-fraktilen) vil være en funktion af de gældende sorteringsregler og være betinget af to væsentlige forhold:

- *valget af sorteringssystem med tilhørende klassegrænser for sorteringsparametrene.*
- *sorteringskvaliteten, dvs ikke blot den grundlæggende (ideelle) sammenhæng mellem sorteringsparameteren og styrken, men tillige den nøjagtighed med hvilken det i praksis er muligt at karakterisere denne sorteringsparameter (målefejlen på sorteringsparameteren).*

I det følgende gennemføres en statistisk analyse af, hvorledes sorteringskvalitet og sorteringsgrænser påvirker sorteringsudbytte og den karakteristiske styrke (5%-fraktilen). Analysen baseres på en stokastisk model, hvor sammenhængen mellem styrke og sorteringsparameter kan beskrives ved en 2-dimensional normalfordeling [Glos et al. 1982]. Endvidere forudsættes, at der eksisterer en lineær relation mellem sorteringsparameter og styrke udtrykt ved formel (1).

Parameteren  $X$  i formel (1), angiver sorteringsparameteren og  $Y$  angiver styrkeparameteren. Bestemmelsen af sorteringsparameteren er forbundet med en afvigelse,  $\tau$ , der antages at være normalfordelt  $N(0, \sigma_\tau^2)$ . I praksis er en given sorteringsgrænse herefter givet ved den stokastiske variabel,  $Z$ :

$$Z = X + \tau$$

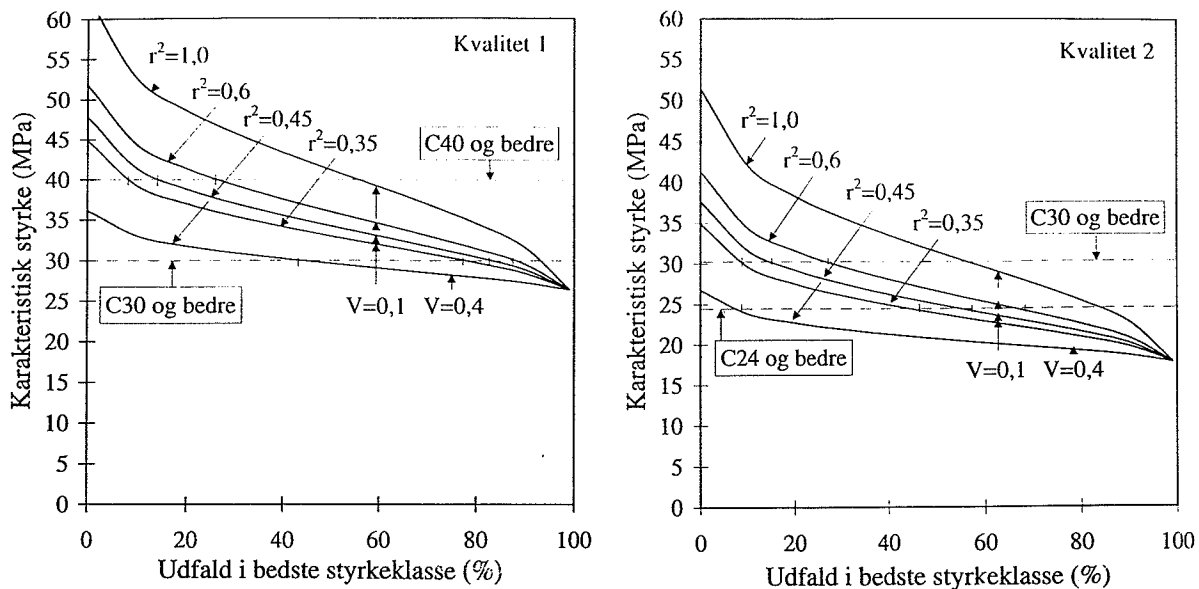
Analysen vil ikke blive beskrevet i detaljer, men illustreres ved 3 *eksempler*, der viser, hvorledes sorteringsudbytte og karakteristisk styrke afhænger af sorteringsprincipets kvalitet (forklaringskoefficienten), og af den nøjagtighed, hvormed sorteringsparametrene kan måles.

Eksemplerne er gennemregnet for to træk kvaliteter, idet såvel udbytte (også kaldet "udfald") og karakteristisk styrke naturligvis er afhængige heraf.

*Kvalitet 1* er en typisk handelskvalitet for nordisk konstruktionstræ. Den gennemsnitlige bøjningsstyrke for de ikke-sorterede planker er antaget lig 45 MPa med en variationskoefficient på 25%. Den tilsvarende karakteristiske bøjningsstyrke er af størrelsesorden 27 MPa. Et sådant materiale svarer omtrent til hvad der er omtalt i [Johansson et al. 1992].

*Kvalitet 2* hører til i den laveste ende af kvalitetsskalaen. Den gennemsnitlige bøjningsstyrke er antaget lig 35 MPa med en variationskoefficient på 30%. Den tilsvarende karakteristiske bøjningsstyrke for de ikke-sorterede planker er her af størrelsesorden 18 Mpa. Denne kvalitet er omtalt i [Hoffmeyer, 1984], hvor netop den absolut ringeste del af nordisk konstruktionstræ ønskedes undersøgt.

I Figur 2.3 illustreres sammenhængen mellem udfald i den bedste styrkeklasse og den tilsvarende karakteristiske bøjningsstyrke for forskellige kvaliteter af sorteringssystemet. Sidstnævnte fastlægges ved kombinationen af sorteringsprincipets kvalitet (udtrykt ved  $r^2$ ) og systemets målefejl (udtrykt ved variationskoefficienten  $V$ ). I figuren er generelt anvendt målefejl svarende til  $V=0,1$ , idet dog en enkelt kurve for en stor målefejl ( $V=0,4$ ) er inkluderet til sammenligning.

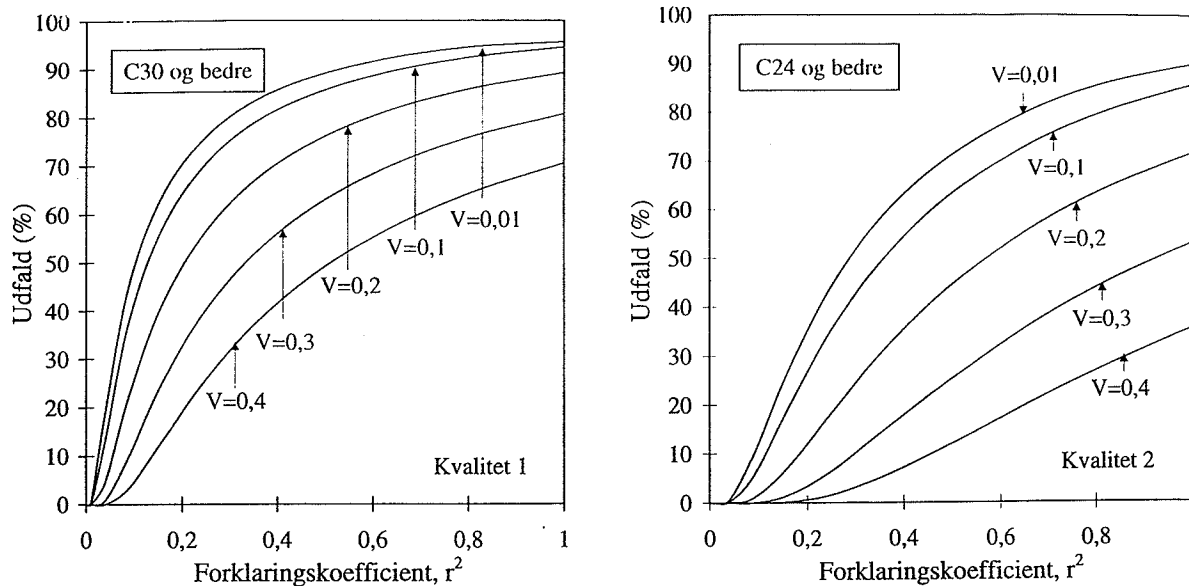


Figur 2.3 Sammenhængen mellem udfald og den karakteristiske styrke for den bedste styrkeklasse som funktion <sup>1)</sup> af forklaringskoefficient,  $r^2$ , for sammenhængen mellem sorteringsparameter og bøjningsstyrke, og <sup>2)</sup> målefejl ved bestemmelsen af sorteringsparameter, udtrykt ved variationskoefficienten  $V$ .

For *kvalitet 1* (normalt nordisk konstruktionstræ) ses, at styrkeklassen C27 tilfredsstilles helt uden sortering. Opnåelsen af styrkeklassen "C30 og bedre" sker med et udfald på 80-90%. At forbedre sorteringsprincippet fra eksempelvis  $r^2 = 0,45$  til  $r^2 = 0,60$  giver kun en beskedne forøgelse af udfaldet fra 85% til 90%. Til gengæld vil en meget dårlig målenøjagtighed ( $V=0,4$ ) resultere i en halvering af udfaldet. Disse forhold fremgår tydeligt af Figur 2.4, hvor sammenhængen mellem udfald, forklaringskoefficient og målenøjagtighed er illustreret for sorteringen "C30 og bedre". Eksemplet understreger vigtigheden af at målenøjagtigheden ikke sænkes ved eksempelvis at forøge gennemløbshastigheden for meget.

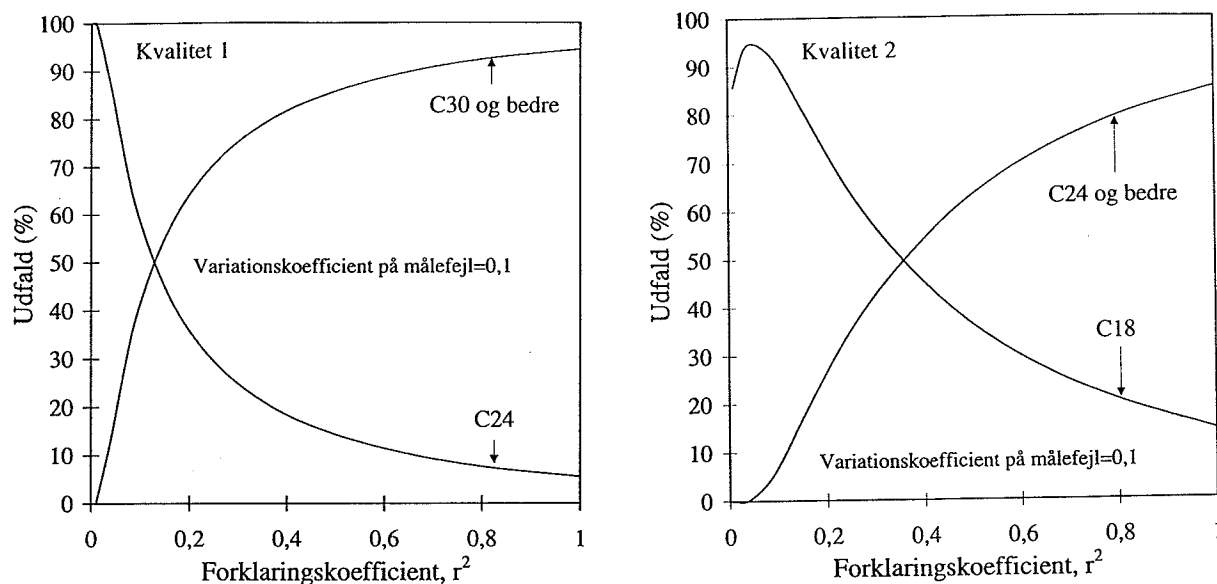
Styrkeklassen "C40 og bedre" giver et betydeligt udfald for *kvalitet 1* (Figur 2.3). I modsætning til "C30 og bedre" ses forklaringskoefficienten her at spille en betydelig rolle. En forøgelse af  $r^2$  fra 0,45 til 0,60 resulterer i en forøgelse af udfaldet fra 14% til 25%. Med en målenøjagtighed så lav som  $V=0,4$  kan der ikke sorteres til styrkeklassen "C40 og bedre".

For *kvalitet 2* ses samme tendenser som for *kvalitet 1*, blot er der tale om indplacering i lavere styrkeklasser. *Kvalitet 2* tilfredsstiller styrkeklassen C18 helt uden sortering. Styrkeklasse "C24 og bedre" opnås for 57% og 67% af hele populationen for forklaringskoefficienterne henholdsvis  $r^2 = 0,45$  og  $r^2 = 0,60$  samt målenøjagtighed svarende til  $V=0,1$ . Med den lave målenøjagtighed på  $V=0,4$  opnås der under 10% udfald i styrkeklassen "C24 og bedre". Den detaljerede sammenhæng for denne styrkeklasse er illustreret i Figur 2.4.



Figur 2.4. Udfald i som funktion af 1) forklaringskoefficient,  $r^2$ , mellem sorteringsparameter og bøjningsstyrke og 2) målefejlen,  $V$ , ved bestemmelse af sorteringsparameter.

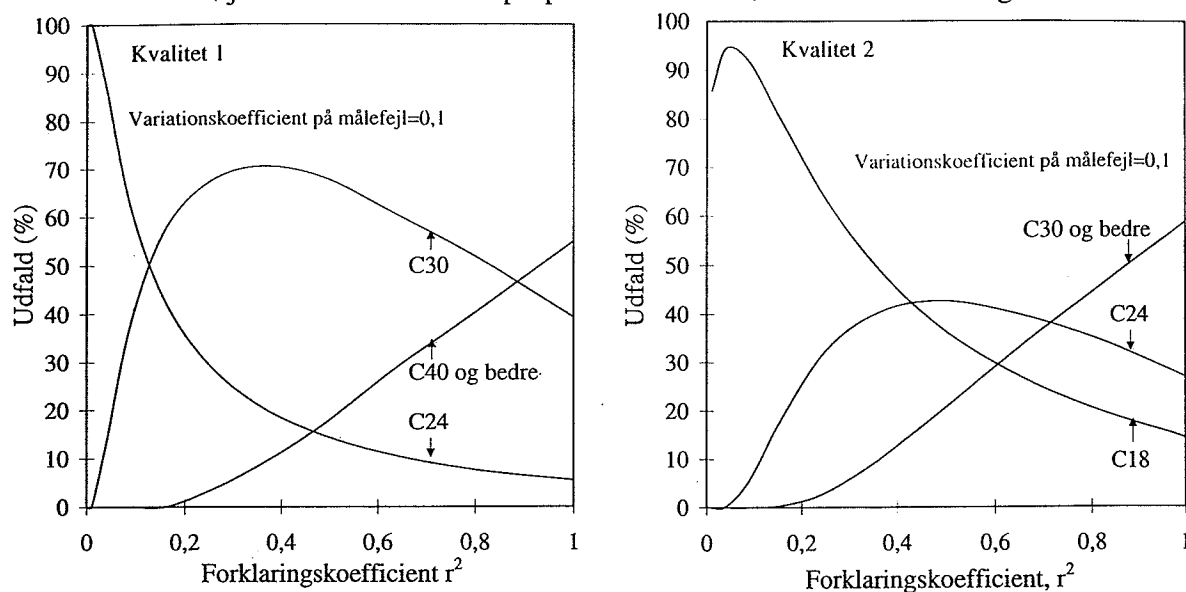
Kvalitet 2 indeholder mere end 50% af klassen "C30 og bedre". Med eksisterende metoder ( $r^2=0,6$  og  $V=0,1$ ) kan opnås et udfald af C30 på knap 30%. Med den lave målenøjagtighed ( $V=0,4$ ) kan der imidlertid ikke sorteres "C30 og bedre".



Figur 2.5 Udfald som funktion af forklaringskoefficient,  $r^2$ , mellem sorteringsparameter og bøjningsstyrke. Målefejlen på sorteringsparameteren er sat til  $V=0,1$ , hvilket formentlig kan opnås af de bedste sorteringsmaskiner. Der er sorteret til to standardklasser.

Af ovenstående fremgår, at kravene til styrkesorteringens kvalitet er højest for de høje styrkesorteringsklasser. Ønskes alene en opdeling i 2 lave klasser, er det ikke nødvendigt med stor præcision. Dette er tilfældet, såfremt kvalitet 1 alene ønskes sorteret til C24 og "C30 og

bedre”, og tillige tilfældet såfremt kvalitet 2 alene ønskes sorteret til C18 og “C24 og bedre”. I begge tilfælde er der ingen signifikant gevinst ved en forøgelse af forklaringskoefficienten udover ca.  $r^2=0,5$  (Figur 2.5). Ønskes derimod en opdeling i tre styrkeklasser (Figur 2.6) ses, at udfaldet i den højeste klasse er direkte proportionalt med størrelsen af forklaringskoefficienten.



Figur 2.6 Udfald som funktion af forklaringskoefficient,  $r^2$ , mellem sorteringsparameter og bøjningsstyrke. Målefejlen på sorteringsparameteren er sat til  $V=0,1$ , hvilket er en realistisk nøjagtighed i praksis. Der er sorteret til tre standardklasser.

## 2.3 Sammenhæng mellem styrke/stivhed og de ikke-destruktive parametre

I dette afsnit omtales de ikke-destruktive parametres indflydelse på bøjningsstyrken, trækstyrken, og stivheden. I afsnittet er kun medtaget parametre, der har signifikant indflydelse på de mekaniske egenskaber.

Omtalen er hovedsageligt baseret på resultaterne fra 5 større undersøgelser af konstruktionstræ. Kendetegnene for undersøgelserne er, at udgangspunktet for disse ikke har været at skaffe generel information om sammenhængene mellem de mekaniske egenskaber og de ikke-destruktive parametre. Resultaterne kan derfor være påvirket af de specielle betingelser, hvorunder de pågældende forsøg har været gennemført.

### 2.3.1 Bøjningsstyrke

Tabel 2.1 viser sammenhængen mellem bøjningsstyrken og diverse parametre, i form af forklaringskoefficienter,  $r^2$ . Der er i tabellen ikke korrigeret for uoverensstemmelser i fugtindhold eller dimension.

Som det fremgår, er der væsentlige forskelle i koefficienterne for de enkelte undersøgelser. Disse forskelle kan delvis forklares ved uoverensstemmelser i materiale og metoder for de enkelte undersøgelser. Undersøgelserne er således ikke umiddelbart sammenlignelige.

| Ikke-destruktive parametre<br>for bøjningsstyrken | Forklaringskoefficient, $r^2$ |      |      |      |      |      |      |  |
|---------------------------------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|--|
|                                                   | Bøjning                       |      |      |      | Træk |      |      |  |
| Kilde:                                            | 1                             | 2    | 3    | 4    | 1    | 5    | 6    |  |
| Knaster                                           | 0,27                          | 0,20 | 0,16 | 0,25 | 0,36 | 0,42 | 0,30 |  |
| Årringsbredde                                     | 0,21                          | 0,27 | 0,20 | 0,44 | 0,36 | 0,33 | 0,28 |  |
| Densitet                                          | 0,16                          | 0,30 | 0,16 | 0,40 | 0,38 | 0,29 | 0,38 |  |
| Elasticitetsmodul, bøjn. eller træk               | 0,72                          | 0,53 | 0,55 | 0,56 | 0,70 | 0,69 | 0,58 |  |
| Elasticitetsmodul, fladside, kort spændvidde      |                               |      |      |      |      |      | 0,74 |  |
| Elasticitetsmodul (Computermatic)                 | 0,49                          |      |      | 0,55 | 0,66 |      |      |  |
| Elasticitetsmodul (Tecmach)                       | 0,55                          |      | 0,36 |      | 0,64 |      |      |  |
| Knaster + årringsbredde                           | 0,37                          | 0,42 | 0,39 |      | 0,49 |      | 0,48 |  |
| Knaster + densitet                                | 0,38                          |      | 0,38 |      | 0,55 | 0,61 | 0,64 |  |
| Knaster + elasticitetsmodul                       | 0,73                          | 0,58 | 0,64 |      | 0,70 | 0,76 | 0,78 |  |
| Knaster + Computermatic                           | 0,56                          |      |      | 0,67 | 0,71 |      |      |  |

*Tabel 2.1. Oversigt over forklaringskoefficienterne fra diverse undersøgelser af sammenhængen mellem bøjningsstyrke og ikke-destruktive parametre, for rødgran (Picea abies). Numrene angivet i tabelhovedet refererer til følgende undersøgelser: 1 [Johansson et al. 1992]; 2 [Hoffmeyer 1984]; 3 [Hoffmeyer 1990]; 4 [Lackner et al. 1988]; 5 [Glos et al. 1982]; 6 [Johansson 1976].*

Det fremgår endvidere, at af de gengivne parametre er *stivheden* (elasticitetsmodulen) af en planke den bedste enkeltparameter til styrkeforudsigelse. Dette gælder uanset om stivheden bestemmes på smal- eller bredsidens. Korrelationen mellem stivhed og bøjningsstyrke er samtidigt den mest "konstante" værdi imellem undersøgelserne, således er 53-72% af variationen i bøjningsstyrken forklaret ved bjælkens stivhed alene.

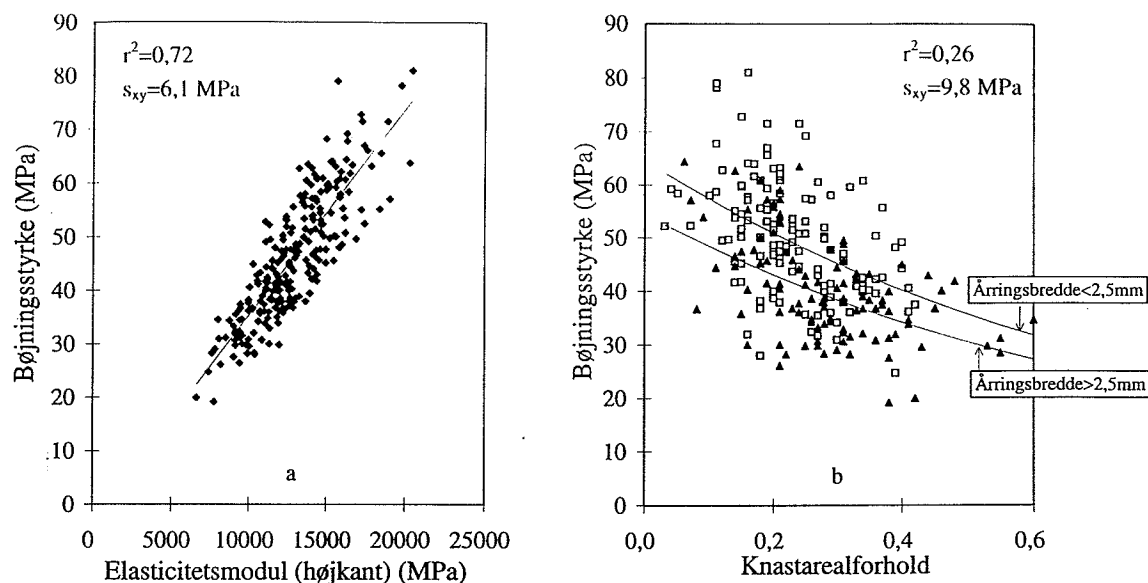
I Figur 2.7.a er afbildet sammenhængen mellem bøjningsstyrke og stivhed (elasticitetsmodul) som fundet af Johansson et al. [1992] for planker af rødgran. Bemærk bøjningsstyrkens klart stigende tendens med stigende elasticitetsmodul og den forholdsvis lille spredning omkring regressionslinien.

Forklaringskoefficienterne i Tabel 2.1 viser, at næstefter stivhed er det knaststørrelse eller densitet, der giver det bedste grundlag for en forhåndsvurdering af bøjningsstyrken. Hvilken af disse parametre, der er den bedste forklarende parameter, afhænger af variationsbredden på densiteten i det pågældende materiale.

De gældende visuelle sorteringsregler i de enkelte nordiske lande baseres hovedsageligt på knaststørrelse og knastplacering, idet det antages, at der findes en tilstrækkelig korrelation mellem størrelse/antal af knaster og de mekaniske egenskaber. Denne antagelse er dog umiddelbart vanskelig at bekræfte udfra resultaterne gengivet i Tabel 2.1, hvor kun 16-26% af variationen i bøjningsstyrken er forklaret ved knasterne.

I Figur 2.7.b er gengivet sammenhængen mellem knastarealforhold og bøjningsstyrke. Knastarealforholdet er målt som forholdet mellem svageste tværsnits knastareal og hele tværsnitsarealet. Det er åbenbart at styrken falder, når knaststørrelsen øges. Det er tillige iøjefaldende, at spredningen i resultaterne er stor, og knastparameterens evne til at forudsige styrken tilsvarende begrænset. I figuren er tillige årringsbreddens betydning anskueliggjort

gennem indtegning af regressionskurverne for materialet for årringsbredde større end eller mindre end 2,5 mm.



Figur 2.7 Bøjningsstyrken som funktion af bøjningselasticitetsmodulen (a) og knastarealforholdet (b) for granplanker [Johansson et al. 1992].

Et bøjningsbrud sker typisk ved knasterne. Alligevel observeres en beskedne sammenhæng (lille forklaringskoefficient) mellem bøjningsstyrke og knaster. Dette kan delvis forklares ved en stor variationsbredde på densiteten. Lackner et al. [1988] undersøgte hurtigtvokset gran, med stor variation i densiteten og fandt en svag korrelation. I undersøgelsen af Hoffmeyer [1990] ses en ringe korrelation for både knaster og årringsbredde, hvilket muligvis kan tilskrives, at der bevidst er udtaget træ af dårlig kvalitet, dvs fra den nedre ende af styrkefordelingen. Dette påvirker som beskrevet i afsnit 2.2 korrelationen i nedadgående retning. En anden forklaring på den overraskende dårlige korrelation mellem knasterne og bøjningsstyrken kan være, at knastvariablen ikke er fastlagt korrekt. Brudet sker sjældent i selve knasten, men derimod i området omkring knasten. Det er derfor tænkeligt, at det er fiberforstyrrelserne omkring knasterne, der giver anledning til, at brudstyrken overskrides, og at disse udover knastens størrelse også afhænger af knastens geometri.

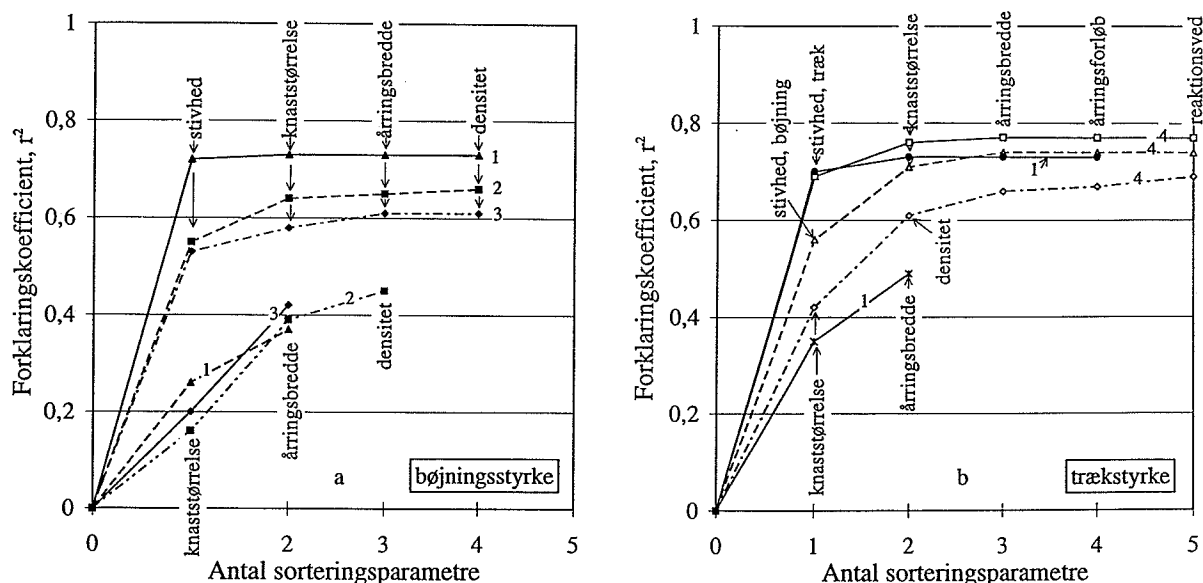
Densiteten er næstefter stivheden den bedste parameter til forudsigelse af styrken for fejlfrit træ. Høje forklaringskoefficienter mellem densitet og bøjningsstyrke er fundet i en række undersøgelser af konstruktionstræ [Thunell 1979; Madsen 1980; Pierce 1980; Vinopal 1980; Dinwoodie 1981]. 16-40 % af variationen i bøjningsstyrken er forklaret ved densiteten alene (Tabel 2.1). Den store spredning skyldes formodentlig en lille variationsbredde i densiteten i de undersøgelser, hvor de svage koefficienter observeres.

Årringsbredden, som er den vikarierende variabel for densiteten, er svagt korreleret til bøjningsstyrken. Dette er imidlertid ikke overraskende i betragtning af den beskedne korrelation mellem densitet og bøjningsstyrke. Dette vil naturligvis påvirke korrelationen i negativ retning. Det ses, at årringsbredde ikke er i stand til helt at træde i stedet for densitet, hvilket synliggør en

af den visuelle sorterings svagheder. Forholdet kompliceres yderligere af, at sammenhængen mellem årringsbredde og styrke er afhængig af det pågældende træs voksested.

*Generel fiberhældningen* har ikke haft signifikant indflydelse på styrken i de nævnte undersøgelser. Dette skyldes at forsøgsmaterialet har været udskåret med lille fiberhældning og variationsbredden derfor har været meget lille. Dette er som regel tilfældet, og det vil derfor være sjældent, at generel fiberhældning har betydning ved styrkesortering.

Tabel 2.1 giver indtryk af, hvilken indflydelse, isoleret set, den enkelte parameter har. I praksis virker de forskellige parametre naturligvis samtidigt, og nogle af dem er indbyrdes afhængige som eksempelvis densitet og årringsbredde. For at få et indtryk af den enkelte parameters indflydelse i det samlede billede foretages en multipel korrelationsanalyse, hvor der tages hensyn til indbyrdes sammenhænge. Man skal dog samtidigt betragte variationsbredden for de forskellige parametre; hvis en variabel, f.eks. densiteten, er repræsenteret ved en meget lille variationsbredde, vil dette nemlig påvirke den beregnede forklaringskoefficient, jævnfør afsnit 2.2.1, og man vil da få det fejlagtige indtryk, at denne variabel kun har ringe betydning for styrken.



Figur 2.8. Multipel regressionsanalyse for bøjningsstyrke og trækstyrke. Sammenhæng mellem antallet af medtagne parametre og den multiple forklaringskoefficient,  $r^2$ , for diverse kombinationer af ikke-destruktive parametre (med og uden stivheden (E-modul)). 1:[Johansson et al. 1992], 2:[Hoffmeyer 1990], 3:[Hoffmeyer 1984], 4:[Glos et al. 1982].

Figur 2.8 præsenterer forklaringskoefficienten som funktion af antallet af benyttede ikke-destruktive parametre. Rækkefølgen, hvori de enkelte parametre indgår i analysen, viser den enkelte parameters relative betydning for forklaringskoefficienten.

Det fremgår, at den bedste kombination af parametre for bøjningsstyrken opnås ved at medtage stivheden (elasticitetsmodul) og knaster i sorteringen. 60-70% af variationen i bøjningsstyrken forklares ved disse to parametre. De øvrige parametre bidrager ikke væsentligt til forbedring af

sorteringskvaliteten. Stivheden er ubetinget den bedste enkeltparameter til styrkeforudsigelse. Effektiviteten af denne ene parameter er større end alle visuelle kriterier anvendt samtidigt (knaster og årringsbredde). Resultaterne fra [Johansson et al. 1992] viser ligefrem, at kvaliteten af forudsigelsen ved benyttelse alene af stivheden ikke forbedres ved inkludering af yderligere kriterier.

Det ses, at sortering efter densitet og knaster er mærkbart bedre end sortering efter knaster alene. Ved at sideordne disse to sorteringsparametre forøges kvaliteten af styrkeforudsigelsen, idet ca. 40% af variationen i bøjningsstyrken forklares. Der kan opnås endnu højere forklaringskoefficienter, såfremt træet stammer fra samme lokalitet og der samtidigt sikres en stor variationsbredde i de potentielle sorteringsparametre [Pierce 1980; Madsen 1980; Kousholt 1980; Johansen et al. 1969].

Boström [1994] kombinerede forskellige knastmål med bøjnings elasticitetsmodulen og viste, at knaststørrelsen målt på kantsiden giver ligeså god korrelation som knastarealforholdet. Dette bekræftes af Johansson et al. [1992]. Det burde altså være tilstrækkeligt, at bestemme knasten på kantsiderne, hvilket reducerer omkostningerne til udstyr.

### 2.3.2 Trækstyrken

Sammenhængen mellem trækstyrken og de ikke-destruktive parametre er præsenteret i Tabel 2.1. Det fremgår, at også for trækstyrken er stivheden den parameter, der forudsiger styrken bedst; ca. 60-70% af variationen i trækstyrken er således forklaret alene ved stivheden. Knaststørrelse synes endvidere at være væsentlig bedre korreleret med trækstyrken end med bøjningsstyrken.

En multipel regressionsanalyse bekræfter for trækstyrken (Figur 2.8) den sammenhæng, som allerede blev fundet for bøjningsstyrken. Det ses, at stivheden målt i trækretningen alene er istand til at forklare 70% af trækstyrkevariationen. Tilføjelse af flere kriterier synes ikke at forøge forklaringskoefficienten væsentligt. Hvis forudsigelsen baseres på stivheden målt ved bøjning på højkant, ses dog en signifikant forøgelse af forklaringskoefficienten ved inkludering af knastkriterier. Figur 2.8 viser endvidere, at visuel sortering er bedre egnet til forudsigelse af trækstyrke end til forudsigelse af bøjningsstyrke.

### 2.3.3 Stivhed (elasticitetsmodul)

Forklaringskoefficienter for sammenhængen mellem elasticitetsmodulen og de ikke-destruktive parametre viser, at det hovedsageligt er sammenhængen med densiteten, der udviser en god korrelation [Foslie et al. 1968, 1971, 1972]. At inddrage knaststørrelsen bidrager ikke væsentligt til at forbedre forudsigelsen af stivheden. Foslie et al. [1972] finder, at ca. 50% af variationen i elasticitetsmodulen er forklaret ved densiteten alene, mens kun ca. 16% er forklaret ved største kantknast. Andre undersøgelser [Hoffmeyer 1990; Johansson et al. 1992] viser dog forklaringskoefficienter så lave som  $r^2 = 0,25$  for sammenhængen mellem elasticitetsmodulen og densiteten.

## **2.4 Andre faktorer, der kan påvirke sammenhængen mellem styrkeegenskaberne og de ikke-destruktive parametre**

I dette afsnit omtales en række andre faktorer, der indvirker på korrelationen mellem styrkeegenskaberne og de ikke-destruktive parametre. Disse faktorer medvirker til at forklare den forholdsvis store spredning imellem undersøgelserne og de overraskende lave korrelationskoefficienter, der observeres for nogle sammenhænge.

### **2.4.1 Højde i træet**

Styrkeegenskaberne for konstruktionstræ varierer med udtagningshøjden i stammen [Madsen 1984; Harvald 1988; Morsing 1990]. Det fremgår af undersøgelserne, at ændringen i styrkeegenskaberne med udtagningshøjden ikke er entydig, men afhænger af træart og af opskæringen [Harvald 1988], dvs. hvorvidt plankerne er udskåret inden for knastkeglen. Faldet i bøjningsstyrken kan således hovedsageligt tilskrives et øget antal og en øget størrelse af knaster med stigende udtagningshøjde, og det vil derfor ikke påvirke kvaliteten af en visuel styrkesortering.

Det fremgår imidlertid også af de nævnte undersøgelser, at sammenhængen mellem bøjningsstyrke/stivhed afhænger af udtagningshøjde. Harvald [1988] og Morsing [1990] har fundet, at planker fra rodstocke af thuja og lærk har en signifikant lavere elasticitetsmodul end planker fra øvrige udtagningshøjder uden af den grund at have en lavere styrke. For samme bøjningsstyrke finder Morsing [1990], at elasticitetsmodulen er reduceret med 5-25% for rodstocke af lærk i forhold til stocke udtaget højere oppe i stammen. Reduktionens størrelsesorden afhænger af elasticitetsmodulens værdi; således er reduktionen størst for planker med lille elasticitetsmodul. Årsagen er ukendt, men det er afgjort et fænomen, der burde undersøges nærmere, bl.a. for andre træarter. Den observerede reduktion i elasticitetsmodulen for planker fra rodstocke vil påvirke udfaldet af en styrkesortering. Det vil betyde, at man ved en styrkesortering, hvori elasticitetsmodulen indgår, samtidigt må have kendskab til den enkelte plankes udtagningshøjde, hvilket for styrkesorteringen er et urealistisk krav.

### **2.4.2 Dimension**

Det er velkendt, at styrken af konstruktionstræ falder med stigende dimensioner. For en bjælke med en bestemt længde vil eksempelvis bøjningsstyrken mindskes, når højden øges. Dette er baggrunden for, at man i konstruktionsnormerne har indført en korrektionsfaktor for den samvirkende effekt af højde og længde.

Hvorledes dimensionseffekten påvirker korrelationen mellem styrkeegenskaberne og de ikke-destruktive parametre, er kun undersøgt i begrænset omfang. Der er en tendens til, at betydningen af densiteten - og dermed også af stivheden - mindskes, mens knasternes betydning øges når tværsnitsdimensionerne mindskes [Adelhøj et al. 1984; Foslie et al. 1972; Solli et al. 1986]. Dette skyldes formodentlig, at knasterne udgør en væsentlig større andel af tværsnittet i små tværnit. Dermed nedtones betydningen af densiteten, hvilket afspejles i forklaringskoefficienterne i de pågældende undersøgelser. Undersøgelserne viser imidlertid ikke nogen entydig reduktion i forklaringskoefficienten, og det er derfor meget vanskeligt at vurdere størrelsesordenen af denne effekt.

Solli [1986] konkluderer, at knasternes store og varierende indvirkning på styrken gør, at en visuel vurdering af konstruktionstræ med små tværsnit ikke giver tilstrækkelig sikkerhed ved de høje styrkeklasser.

#### **2.4.3 Træart**

Sammenhængen mellem bøjningsstyrken og de ikke-destruktive parametre afhænger af den undersøgte træart [Harvald, 1988]. For samme knastmål og med øvrige visuelle parametre og densitet fastholdt, fandt Harvald, at bøjningsstyrken for rødgran er ca. 10-30% højere end bøjningsstyrken for douglasgran. Forskellen er ikke entydig og afhænger af knaststørrelsen.

Det forhold, at der er store forskelle mellem træarterne, selv for fastholdt ikke-destruktive parametre, betyder, at en forudsigelse af bøjningsstyrken ved en visuel styrkesortering bliver dårlig, hvis det drejer sig om partier bestående af flere træarter. Her synes en sortering, hvori stivheden indgår, at være en bedre løsning. Harvald [1988] fandt, at for samme elasticitetsmodul har douglasgran, rødgran, og sitkagran stort set samme bøjningstyrke, hvilket underbygger fordelene ved at anvende elasticitetsmodulen ved sortering af flere træarter samtidigt.

#### **2.4.4 Ungdomsved**

Konstruktionstræ med en andel af ungdomsved, dvs de inderste årringe af stammen, er kendetegnet ved bl.a en lavere densitet. På små knastfrie emner af sitkagran har Brazier [1985] fundet, at emner med stor ungdomsvedsandel har ringere styrkeegenskaber sammenlignet med emner af voksentved. Denne forskel kan ikke udelukkende tilskrives forskelle i densitet. Brazier mener, at forskellen ved samme densitet skyldes den større mikrofibrilvinkel i cellevæggen, der kendetegner ungdomsved sammenlignet med voksentved. Danborg [1994] kunne imidlertid ikke bekræfte denne reduktion i styrkeegenskaberne for konstruktionstræ. Konklusionen er dog draget på grundlag af relativt få planker, og spørgsmålet bør derfor undersøges nærmere.

Kan der påvises en forskel i styrken for samme elasticitetsmodul og densitet mellem ungdomsved og voksentved vil dette have indflydelse på styrkesorteringen. En sortering, hvori eksempelvis elasticitetsmodulen indgår, vil forudsige en højere styrke end den aktuelle brudstyrke for planker med stor andel af ungdomsved.

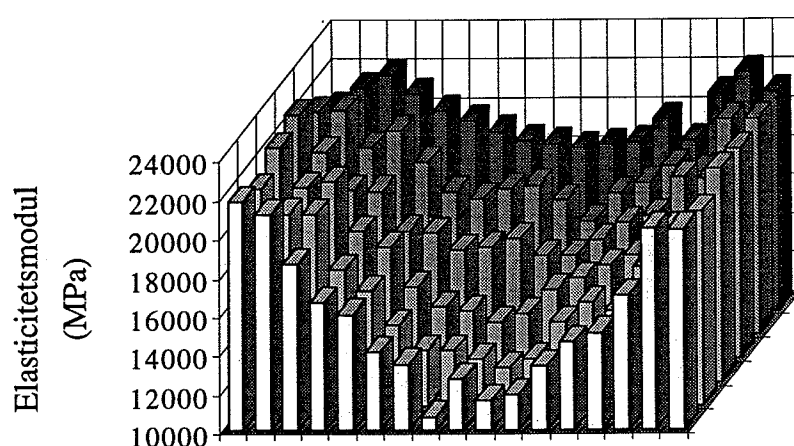
#### **2.4.5 Sammenhængen mellem elasticitetsmodulen på smalsiden og på breddesiden**

Ved maskinsortering på basis af elasticitetsmodul belastes konstruktionstræet i den svage retning (breddesiden), mens det i praksis hovedsageligt belastes i den stærke retning (smalsiden). Årsagen til, at der sorteres efter elasticitetsmodul på breddesiden er, at belastninger, udbøjninger og spændvidder er på et passende lavt niveau. Skulle der sorteres på højkant, ville det kræve uacceptabelt store belastninger at opnå en passende udbøjning med de korte spændvidder, der kræves for en lokal bedømmelse af planken.

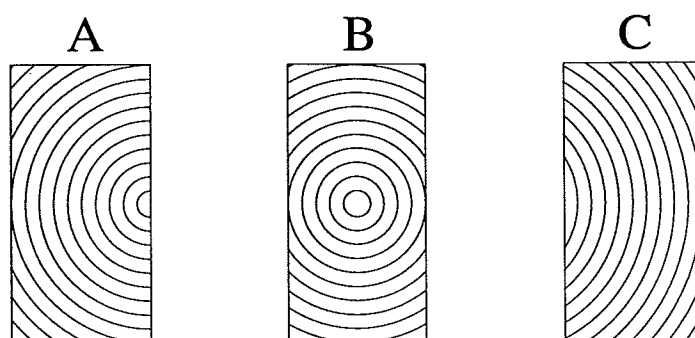
Der eksisterer imidlertid en signifikant forskel mellem elasticitetsmodul målt på breddesiden og elasticitetsmodul målt på smalsiden; dette påvirker sorteringsudbyttet [eks. Boström, 1994]. Forklaringskoefficienten mellem elasticitetsmodul på breddeside og på smalside angives af Boström [1994] at ligge mellem 0,56 og 0,86 afhængig af dimension. Den forholdsvis beskedne

sammenhæng beror på flere faktorer, bl.a knasternes placering og elasticitetsmodulens variation over tværsnittet.

Elasticitetsmodulen er ikke konstant over et tværsnit. Ved marven er elasticitetsmodulen lav, og den stiger ud mod barkkanten. Dette er eksempelvis vist af Wormuth [1993] (Figur 2.9). Variationen gør, at den målte elasticitetsmodul for hele tværsnittet varierer afhængig af om plankerne prøves på smalsiden eller breddesiden. Størrelsen af denne forskel afhænger af, hvor meget elasticitetsmodulen varierer over tværsnittet, samt hvordan planken er udskåret af stammen. Forskellen er større for midtudbytte end for sideudbytte. Indstillingsværdier for en maskine, opnået på basis af marvskårne planker som vist i Figur 2.10 (A), giver en undervurdering af (B) og en overvurdering af (C).



Figur 2.9 Elasticitetsmodulens variation over et tværsnit [Wormuth, 1993].



Figur 2.10 Eksempel på marvskåret planke (A), midtudbytte (B) og sideudbytte (C).

## 2.5 Udbytte som funktion af sorteringsystemernes kvalitet

Med baggrund i kapitlerne 2.2 og 2.3 gives herefter en vurdering af de visuelle og maskinelle styrkesorteringssystemers muligheder for effektivt at sortere nordisk konstruktionstræ til de styrkeklasser, der findes defineret i EN338. Vurderingen tager udgangspunkt i <sup>1)</sup> en normal handelskvalitet for nordisk gran (kvalitet 1) og <sup>2)</sup> en handelskvalitet for nordisk gran af særlig lav kvalitet (kvalitet 2).

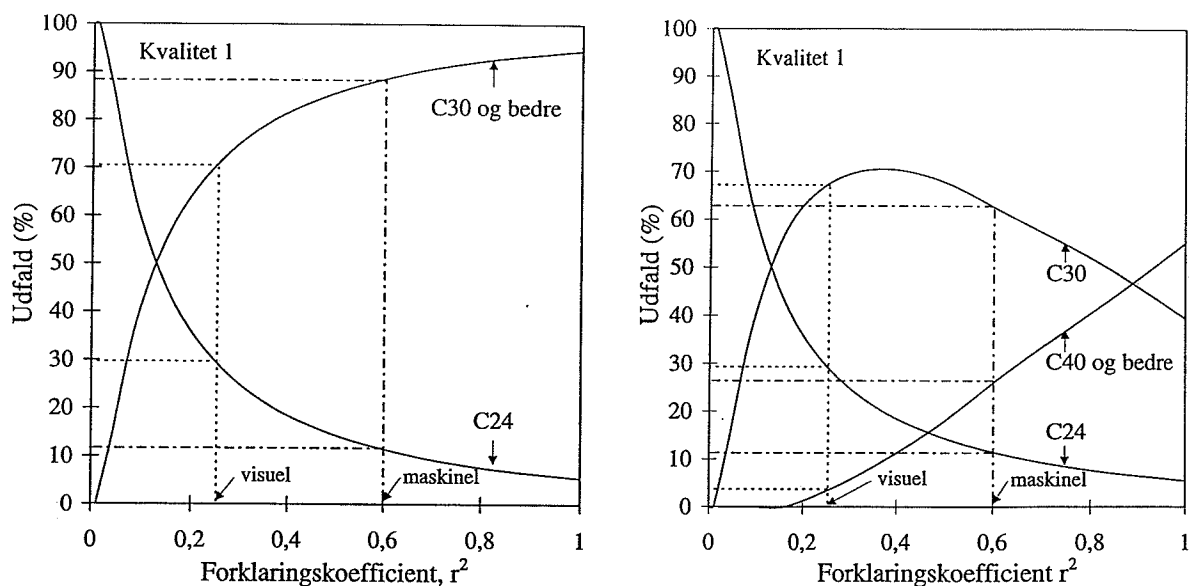
Af kapitel 2.3 fremgår, at normal visuel styrkesortering tilsyneladende typisk vil kunne gennemføres med en forklaringskoefficient på  $r^2=0,35-0,40$ . Dette resultat vil kunne opnås alene ved bedømmelse af knaster og årringsbredde. At medtage kriterier som fiberhældning og reaktionsved vil normalt ikke forøge den visuelle styrkesorterings kvalitet. Det vil derimod resultere i forøget sorteringskvalitet ( $r^2=0,45-0,55$ ), såfremt densiteten bliver medtaget som kriterium. Dette peger på behovet for udvikling af et prisbilligt og letbetjent densitetsmåleinstrument, som kan anvendes som supplement til den normale visuelle sortering.

En maskinel styrkesortering, der medtager alle sorteringskriterier, vil under ideelle forhold kunne give forklaringskoefficienter på  $r^2=0,60-0,75$ . Sortering på basis af stivhed alene reducerer forklaringskoefficienten til  $r^2=0,55-0,70$ .

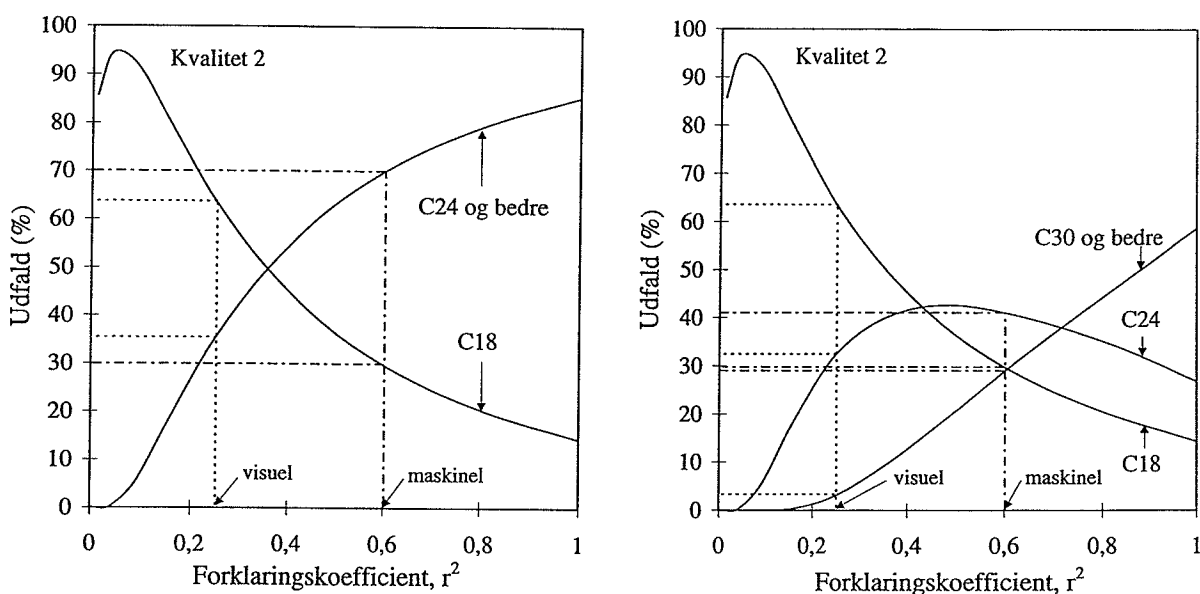
I det følgende er det antaget, at visuel sortering gennemføres med en forklaringskoefficient på  $r^2=0,25$  og en målefejl på  $V=0,1$ . Maskinsortering er forudsat gennemført med en forklaringskoefficient på  $r^2=0,60$  og en målefejl på  $V=0,1$ . Tallene for  $r^2$  er, specielt for visuel sortering, i underkanten af, hvad der er nævnt i det foregående. Årsagen er bl.a., at der i praksis sker en samtidig sortering af træ fra mange forskellige voksesteder (lokaliteter). Træ fra forskellige lokaliteter vil udvise forskellig afhængighed af de ikke-destruktive sorteringsparametre. For den enkelte lokalitet kan der således udmærket findes en høj forklaringskoefficient, men anvendelse af én model for alle lokaliteter resulterer i en reduceret  $r^2$ -værdi. Dette forhold gør sig især gældende for årringsbredden, som anvendes ved visuel styrkesortering. Hertil kommer, at det i praksis ikke er muligt at udforme reglerne for visuel sortering på en måde som til fulde afspejler den indbyrdes afhængighed af knast- og årringskriterierne.

Ved nedenstående diskussion af sorteringsystemernes kvalitet må tillige erindres, at konklusionerne er baseret på en forudsætning om, at sorteringskriterierne både for visuel- og maskinel styrkesortering er valgt optimalt. I virkeligheden er dette imidlertid ikke tilfældet; både de visuelle og maskinelle kriterier er fastsat udfra et begrænset antal forsøg med planker, der ikke nødvendigvis har været fuldt repræsentative for dagens markedssituation. For maskinel styrkesortering vil der dog være en mulighed for ved en kollektiv ændring af alle maskiners indstilling at korrigere sorteringen i overensstemmelse med eventuelle nye forskningsresultater. For visuel styrkesortering, derimod, er det betydelig vanskeligere at tage hensyn til sådanne eventuelle nye forskningsresultater, idet den resulterende ændring af reglerne kræver indlæring af nye rutiner hos et meget stort antal sorterere. Derfor skal nedenstående tal ikke læses som eksakte gengivelser af konkrete styrkesorteringssituationer, men snarere udtrykker nogle generelle tendenser:

For nordisk konstruktionstræ af normal kvalitet (*kvalitet 1*), med en karakteristisk bøjningsstyrke på 27 MPa for de usorterede planker, vil en visuel sortering ( $r^2=0,25$ ) umiddelbart kunne opgradere ca. 70% af materialet til "C30 og bedre" (Figur 2.11), mens det ikke er muligt, at udsortere "C40 og bedre" (ca. 3%). Heroverfor står maskinsortering ( $r^2=0,60$ ), som udmærker sig ved en mere sikker udsortering især i de høje klasser. For kvalitet 1 er der en gevinst ved



Figur 2.11 Udfald ved visuel og maskinel sortering af normal kvalitet af nordisk konstruktionskvalitet (*kvalitet 1*). Der er forudsat sorteret til to klasser (venstre) eller tre klasser (højre)



Figur 2.12 Udfald ved visuel og maskinel sortering af særlig lav kvalitet af nordisk konstruktionskvalitet (*kvalitet 2*). Der er forudsat sorteret til to klasser (venstre) eller tre klasser (højre)

maskinsortering for klasse "C30 og bedre", idet udfaldet øges fra ca. 70% til ca. 90%. For den høje klasse "C40 og bedre" er der derimod en relativt meget større gevinst ved maskinsortering, idet udfaldet forøges fra ca. 3% til ca. 25%.

For nordisk konstruktionstræ af særlig lav kvalitet (*kvalitet 2*), med en karakteristisk bøjningsstyrke på 18 MPa for de usorterede planker, vil en visuel sortering umiddelbart kunne opgradere ca. 35% til "C24 og bedre" (Figur 2.12), mens det ikke er muligt at udsortere mere "C30 og bedre" (ca. 3%). Ved maskinsortering er der en væsentlig gevinst ved sortering til klasse "C24 og bedre", idet udfaldet fordobles fra ca. 35% til 70%. Også for den høje klasse, "C30 og bedre", giver maskinsortering et markant forbedret udfald med en forøgelse fra ca. 3% til ca. 30%.

Som et generelt træk ved begge kvaliteter ses, at der ved sortering til tre klasser findes en lineær sammenhæng mellem forklaringskoefficient og udbytte for den højeste kvalitetsklasse. Dette understreger, at den avancerede styrkesorteringsmaskine (høj  $r^2$ -værdi, lille målefejl) er særlig fordelagtig (og nødvendig) ved sortering til høje styrkeklasser (f.eks. limtræ). Ved sortering til én eller to lave klasser er maskinsorteringens fordele mindre iøjnefaldende. Imidlertid burde netop det lavere krav til sorteringskvalitet anspore til udvikling og anvendelse af mindre avancerede og dermed billigere maskiner til formål, hvor sortering til høje styrkeklasser ikke er aktuelt.

Ved sammenligning af ovenstående med resultater fra eksempelvis [Johansson et al. 1992] ses, at der i praksis fås et mindre udbytte end her antaget. Dette tyder på, at antagelsen om en variationskoefficient på  $V=0,1$  er for optimistisk med de for øjeblikket anvendte sorteringsmetoder. Det understreger endvidere, at både de visuelle sorteringskriterier og maskinindstillingerne er fastsat for konservativt.

## 2.6 Konklusion

Den visuelle styrkesortering har en række fordele og ulemper, der tydeliggør behovet for maskinel styrkesortering. Den visuelle styrkesortering er enkel at forstå, den kræver ingen store investeringer, og styrkesorteringsklassen kan altid senere kontrolleres. Til gengæld kan en visuel vurdering af træ hverken i tilstrækkelig grad tage hensyn til træs mikrostruktur og densitet eller kombinere sorteringskriterierne (f.eks. knaster og årringsbredde) optimalt. Forudsigelsen af styrken bliver derfor heller ikke optimal. Visuel styrkesortering er endvidere subjektiv og af den grund behæftet med stor målefejl. Heroverfor står maskinel styrkesortering, som en betydelig dyrere, men samtidig objektiv og mere effektiv metode. Maskinsortering resulterer i betydeligt større udbytte specielt i de højere styrkeklasser, og metoden kan sortere til de højeste styrkeklasser, som er utilgængelige for visuel styrkesortering. Endvidere kan maskinel styrkesortering bedre end visuel sortering tilfredsstille kravet i EN338 om veldefinerede densitetssegenskaber hos det styrkesorterede træ.

Kvaliteten af en styrkesortering kommer til udtryk for det første ved sammenhængen (korrelationen) mellem styrken og sorteringskriterierne og for det andet ved den nøjagtighed hvormed sorteringsparameteren kan fastlægges. Kvaliteten af et styrkesorteringsprincip udtrykkes ved den såkaldte forklaringskoefficient,  $r^2$ , hvis værdi ligger mellem 0 og 1;

eksempelvis betyder  $r^2=0,60$ , at 60% af variationen i styrkeparameteren er forklaret ved variationen i sorteringsparameteren.

Visuel styrkesortering vil under ideelle forhold kunne gennemføres med en forklaringskoefficient på  $r^2=0,35-0,45$ . Dette resultat vil kunne opnås alene ved bedømmelse af knaster og årringsbredde. At medtage kriterier som fiberhældning og reaktionsved vil normalt ikke forøge den visuelle styrkesorterings kvalitet. Det vil derimod resultere i forøget sorteringskvalitet ( $r^2=0,45-0,55$ ), såfremt densiteten bliver medtaget som kriterium. Dette peger på behovet for udvikling af et prisbilligt og letbetjent densitetsmåleinstrument, som kan anvendes som supplement til den normale visuelle sortering.

Ved en maskinel sortering kan udover de visuelle kriterier tillige anvendes stivhed og densitet. For disse opnås forklaringskoefficienter af størrelsesorden henholdsvis  $r^2=0,55-0,70$  og  $r^2=0,20-0,35$ . Ved en kombination af to eller flere sorteringskriterier kan ved maskinel styrkesortering opnås en bestemmelse af bøjningsstyrken svarende til  $r^2=0,60-0,75$ . Forudsigelse af trækstyrken kan dog også her gøres en smule mere nøjagtigt ( $r^2=0,65-0,80$ ). Ligesom ved visuel styrkesortering giver en anvendelse af mere end to sorteringskriterier ingen væsentlig kvalitetsforbedring.

For maskinel sortering er de to mest betydningsfulde kriterier stivhed og knaststørrelse. Stivheden er ubetinget den bedste enkeltparameter til styrkeforudsigelse. Effektiviteten af denne ene parameter er større end alle visuelle kriterier anvendt samtidigt. Visse resultaterne viser ligefrem, at kvaliteten af forudsigelsen ved benyttelse alene af stivheden ikke forbedres ved inkludering af yderligere kriterier. Knaststørrelsen målt på kantsiden giver ligeså god korrelation til bøjningsstyrke som knastarealforholdet gør. Det burde altså være tilstrækkeligt, at bestemme knasten på kantsiderne, hvilket reducerer omkostningerne til udstyr.

Kravet til en styrkesorteringensmaskines kvalitet er størst for de høje styrkesorteringsklasser. Ønskes alene en sortering til 2 lave klasser, er det ikke nødvendigt at anvende en maskine med høj præcision; der er ingen signifikant gevinst ved en forøgelse af forklaringskoefficienten udover ca.  $r^2=0,5$ . Ønskes derimod en opdeling i tre styrkeklasser, vil udfaldet i den højeste klasse være lineært afhængig af forklaringskoefficientens størrelse.

Det er åbenbart muligt at maskinsortere således, at op til 70-75% af variationen i bøjningsstyrken forudsiges af maskinen. Dette kræver dog, at maskinen måler de relevante sorteringskriterier med stor nøjagtighed. Normalt er der en betydelig spredning på maskiners måleresultater. Ved de almindeligt anvendte nedbøjningsmaskiner kan spredningen være forårsaget af faktorer som eksempelvis svingninger i bjælkerne under gennemkørslen og manglende mulighed for tykkelsesmåling. En maskines målenøjagtighed (variationskoefficienten) udtrykkes ved forholdet mellem standardafvigelsen (spredningen) for gentagne målinger af den samme størrelse og dennes middelværdi. Ved hjælp af en beregningsmodel udviklet til projektet vises det, at der som forventet opnås en forbedring af udfald eller karakteristisk styrke ved en forbedring af målenøjagtigheden. Det viser sig imidlertid, at der ikke nås nogen signifikant forbedring ved en reduktion af variationskoefficienten udover 0,1. Denne størrelse af målefejl er det idag kun teknisk muligt at

opnå i de bedste maskinsorteringssystemer. Det kan kun betale sig at investere i reduktion af målefejl for maskiner, der arbejder med lavere præcision end  $V=0,1$ , og som samtidig ønskes anvendt til udsortering til en særlig høj styrkeklasse (f.eks. limtræ).

Det er ved maskinsortering muligt, at nøjes med ét sorteringskriterium (stivhed), men det er dog en fordel at arbejde med to sorteringskriterier; til gengæld kan det ikke betale sig at inkludere en tredje sorteringsparameter. Dette er sandt hvis målefejlen på sorteringskriterierne er lille. Såfremt de anvendte sorteringskriterier er unøjagtigt bestemt, kan der imidlertid opnås en forbedring af maskinens kvalitet ved indførelse af et ekstra kriterium.

Træ fra forskellige voksesteder (lokaliteter) vil udvise forskellig afhængighed af de ikke-destruktive sorteringsparametre. For den enkelte lokalitet kan der udmærket findes en høj forklaringskoefficient, men anvendelse af én model for alle lokaliteter resulterer i en reduceret  $r^2$ -værdi. Også i sådanne tilfælde kan det være en fordel, at inkludere et ekstra sorteringskriterium.

## 2.7 Litteratur

Adelhøj, J.; Buchter, J.; Markmann, S. 1984: Styrke- og stivhedsegenskaber for konstruktionstræ af små dimensioner. 2 udgave, 1 oplag. Dansk Teknologisk Institut.

Boström, L. 1994: Machine Strength Grading. Comparison of Four Different Systems. SP Report 49. Swedish National Testing and Research Inst.

Brazier, J.D. 1985: Juvenile Wood. Ed. Kucera, L.J. Xylorama, trends in wood research. Bukhauser Verlag, Basel. 25-32 pp.

Danborg, F. 1994: Juvenile Wood in Spruce. Summary of Ph.D thesis. Unit of Forestry The Royal Veterinary and Agricultural University.

EN338 1994: Structural timber - Strength Classes. Europæisk standard.

EN519 1991: Structural timber - Grading - Requirements for machine strength graded timber and grading machines. Europæisk standard.

Foslie, M.; Moen, K. 1968: Norsk granvirkes styrkeegenskaber. Del 1. Norsk Treteknisk Institutt. Medd. 33.

Foslie, M. 1971: Norsk granvirkes styrkeegenskaber. Del 3. NTI-medd. 42.

Foslie, M.; Moen, K. 1972: Norsk granvirkes styrkeegenskaber. Del 2. Norsk Treteknisk Institutt. Medd. 45.

Glos, P.; Heimeshoff, B. 1982: Möglichkeiten und Grenzen der Festigkeitssortierung von Brettlamellen für den Holzleimbau. In Ingenieur Holzbau in Forschung und Praxis (Ehlbeck u. Steck). Bruderverlag Karlsruhe.

- Harvald, C. 1988: Nåletræarternes tekniske egenskaber. En vedteknologisk undersøgelse af konstruktionstræ fra Statens forstlige Forsøgsvæsens træartsforsøg på Krenkerup skovdistrikt. Skovbrugsinstituttet, KVL, København.
- Hoffmeyer, P. 1984: Om konstruktionstræs styrke og styrkesortering. I Skovteknologi. Et historisk og perspektivisk strejftog. Udgivet af Dansk Skovforening. Særtryk.
- Hoffmeyer P. 1990: Failure of Wood as Influenced by Moisture and Duration of Load. Doctoral thesis. State University of New York. College of Environmental Science and Forestry. Syracuse, New York.
- Johansen, M.; Nielsen, T. F.; Spøhr, H.; 1969: Styrkeforsøg med dansk gran samt en vurdering af styrkesorterings virkninger. SBI-Rapport 62, Statens Byggeforsknings Institut.
- Johansson, C.-J. 1976: Draghållfasthet hos limträlameller. Int. skr nr. S76:18. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Johansson, C.-J.; Brundin, J.; Gruber, R. 1992: Stress Grading of Swedish and German Timber. A comparison of machine stress grading and three visual grading systems. Swedish National Testing and Research Institute Building Technology. SP Report 1992:23.
- Kousholt, K. 1980: Om træs brudmekaniske egenskaber under langtidsbelastning. Laboratoriet for Bygningmaterialer, DTU, Rapport 85.
- Lackner, R.; Foslie, M. 1988: Gran fra Vestlandet - Styrke og sortering. Norsk Treteknisk Institutt. Medd. 74.
- Madsen, T.L. 1980: The efficiency of visual and mechanical stress grading of Norway spruce timber, and the possibility of improving the methods by means of Pilodyn instrument or additional ring width limits. Paper presented at the Iufro Division V Conference, Oxford.
- Madsen, T.L. 1984: Styrkeundersøgelser af dansk gran. Dansk Skovf. Tidsskr. 69: 47-59
- Morsing, N. 1990: E-modulets variation med udtagningshøjden i stammen. Kursusopgave, Laboratoriet for Bygningmaterialer, Danmarks Tekniske Universitet.
- Pierce, C.B. 1980: Strength Prediction and Sampling of Timber in Structural Sizes. Princess Risborough Lab.
- Solli, K.; Lackner, R. 1986: Konstruktionsjonsvirke med små tverrsnitt. Norsk Treteknisk Institutt. Medd. 72.
- Thunell, B. 1979: Flexural strength-stiffness relationships for structural Swedish softwoods. Pap. och Trä. 5:309-322.

Vinopal, G. W. 1980: Determination of the combined influence of density and knots on the mechanical properties of full-size structural timber. Paper presented at IUFRO-5 Conference, Oxford.

Wormuth, E.W. 1993: Untersuchung des Verhältnisses von Flachkant zu Hochkant ermitteltem Elastizitätsmodul von Schnittholz zur Verbesserung der maschinellen Festigkeitssortierung. Diplomarbeit an der Universität Hamburg Fachbereich Biologie.

### 3 Registrering av fysiske parametere og nye bruksområder for kjente prinsipper

De fleste styrkesorteringsmaskinene som til nå har vært brukt i Norden, er såkalte bøyebaserte maskiner. Metoden går ut på å måle materialets bøyestivhet punktvis i plankenes lengderetning, for så å estimere fasthetsegenskapene gjennom kjente sammenhenger mellom MOE og bøyefasthet (og evt. andre materialparametere). Metoden er relativ enkel og den har den store fordel at en måler direkte på materialegenskapene. Disse maskinene har også en innebygget sikkerhet ved at ekstreme planker vil bli ødelagt i maskinen (indirekte "proofload grading") da den påførte bøyespenningen under sortering ligger i størrelse 13 - 15 MPa.

En ulempe med slik "fysisk testing", er at det kreves relativt store krefter under sorteringsprosessen. Dette kombinert med dagens krav til produksjonshastighet, gjør at det lett oppstår rystelser i maskinene. Dette kombinert med problemene rundt hurtig kraftpåføring av plankene, har ofte medført en for unøyaktig sortering. Vanligvis slår dette ut til sikker side, i den forstand at materialene nedklasses. For produsenten er dette imidlertid en uholdbar situasjon og mye av hensikten med en maskin er borte.

Teknologien som benyttes i disse maskinene ble utviklet for flere 10-år siden, og maskinene har ikke helt fulgt med den tekniske utviklingen. Selv om det har skjedd en viss oppgradering, er det mange som i dag venter på nye generasjoner av maskiner som er tilpasset dagens teknologi og produksjonsutstyr/hastighet. Det kan for eksempel være snakk om raskere databehandling på grunn av moderne datateknologi. Eller mulighet til å registrere flere parametere samtidig på grunn av både ny teknologi og ny viten om trevirke og dets styrkerelaterte parametre.

I dette kapitlet vil en se på hvilke muligheter og metoder en i dag kjenner når det gjelder parametere og korresponderende målemetoder. Enkelte av metodene er allerede langt utviklet, andre er på tidligere stadier. Når det gjelder disse siste, er det vanskelig å forutsi om alle har en praktisk/industriell framtid. Det er i denne sammenheng ikke tilstrekkelig å bestemme styrkeegenskapene eksakt dersom metoden krever at den må foregå under laboratorieforhold, eventuelt dersom utstyrskostnadene er astronomiske. Felles for de fleste metodene er at de er utviklet innenfor mer generell forskning, og at de nå forsøkes tilpasset til bruk på trevirke. En kan i denne forbindelse nevne bruk av røntgen til å detektere for eksempel kvister.

I kapitlet ser en også på alternative metoder til databehandling. En mener i denne sammenheng ikke nødvendigvis data fra "nye" parametre. Det kan like gjerne være metoder for å bearbeide måleverdier fra bøyebaserte maskiner, men da på en måte som kan eliminere eventuelle feilkilder.

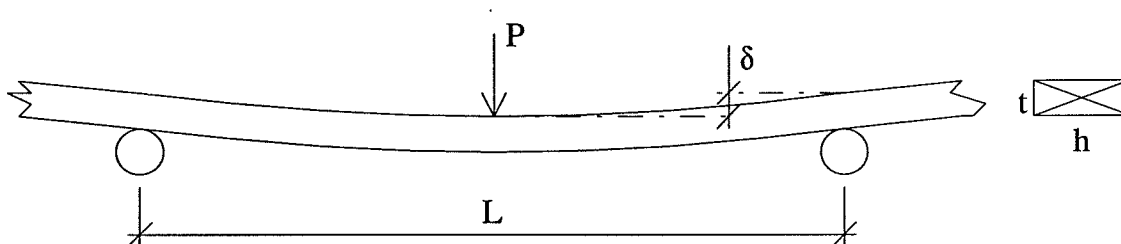
### 3.1 Bøjstivhet

#### 3.1.1 Princip

Den i dagsläget helt dominerande principen för maskinsortering bygger på mätning av virkets bøjstivhet vid belastning på flatsidan. Mätningen i sorteringsmaskinen sker ofta som ett trepunkts bøjprov där virket belastas i den veka riktningen. Elasticitetsmodulen kan beräknas enligt uttrycket

$$E_{\text{flatsida}} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \delta} \quad (3.1)$$

där  $P$  är kraften,  $L$  spännvidden,  $I$  tröghetsmomentet ( $I=ht^3/12$ ) och  $\delta$  är utbøjningen (Figur 3.1.1).



Figur 3.1.1 Trepunkts bøjprov på lågkant.

Elasticitetsmodulen enligt ekv 3.1 är ett mått på åtminstone två för virkeshållfastheten avgörande egenskaper, nämligen det felfria trämateriallets styrka och eventuella kvistars inverkan (snedfibrigheten runt kvistarna orsakar nämligen en lokal minskning av elasticitetsmodulen).

Elasticitetsmodulen som den bestäms i maskinerna ger också en någorlunda korrekt värdering av tjurved. Denna karakteriseras av hög densitet och låg elasticitetsmodul i fiberriktningen samt förhållandevis låg draghållfasthet. Maskiner som bygger på mätning av densiteten, t ex med gamma-strålning/absorption, övervärderar hållfastheten hos virke med tjurved.

#### 3.1.2 Användningsområde

Genom mätning av elasticitetsmodulen genom bøjning på lågkant kan flera material-egenskaper bedömas. Elasticitetsmodulen ger ett bra mått på virkets hållfasthet och elasticitetsmodul vid bøjning på högkant och på densiteten (även ovanför fibermättnadspunkten vilket kan vara ett problem för andra typer av mätutrustningar).

#### 3.1.3 Fördelar

Bøjstivheten eller elasticitetsmodulen i bøjning på lågkant är den enskilt bästa parametern för korrelation mot virkets hållfasthet. Genom mätning av elasticitetsmodulen i bøjning uppskattas virkets bøjhållfasthet med god noggrannhet.

Metoden ger även en bra uppskattning av virkets densitet. En stor fördel är att elasticitetsmodulen kan bestämmas även vid höga fuktkvoter, över fibermättnadspunkten, vilket är svårt med andra metoder.

Det är enkelt att konstruera och bygga en maskin för mätning av elasticitetsmodulen genom böjning. Därmed kan priset för en sådan maskin hållas lågt.

Principen är enkel och därmed kan underhåll och kalibrering i stor utsträckning utföras av maskinoperatören.

Metoden är säker ur arbetsmiljösynpunkt.

### 3.1.4 Nackdelar

Vid sortering sker normalt belastningen i den veka riktningen (på lågkant) medan virket i praktiken används i den styva riktningen (på högkant). Skälet till att virket sorteras på lågkant är att laster, utböjningar och spännvidden då blir på rimliga nivåer. Belastning på högkant skulle kräva mycket stora laster för att åstadkomma en rimlig utböjning med de korta spännvidder som krävs för att lokalt kunna bedöma virket.

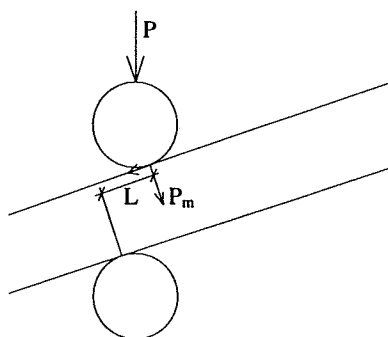
I flertalet typer av böjande maskiner kommer virket i svängning vid själva pålastningen, eller när det träffar upplagsrullarna. Denna svängning kan i hög grad påverka mätningen.

Vid mätning av virket genom maskinen kläms virket fast mellan två eller fler rullar. Hur virket spänns in varierar mellan olika maskiner. Vissa maskiner har endast mätning på en sida, exempelvis Computermatic, medan andra spänner in virket både på inmatnings- och utmatningssidan, exempelvis Tecmach. Denna inspanning kan påverka mätningen på flera olika sätt beroende på utformningen av maskinen.

Matarrullar kan med sina klämkrafter ge upphov till tvångskrafter och moment, se Figur 3.1.2. Virket kläms mellan rullarna med kraften  $P$ . På grund av att virket böjs i maskinen kommer virket inte att ligga i rät vinkel med centrumlinjen mellan rullarna. Därför uppstår ett kraftpar med hävarmen  $L$  som ger upphov till det extra momentet  $M_{\text{extra}}$  enligt följande:

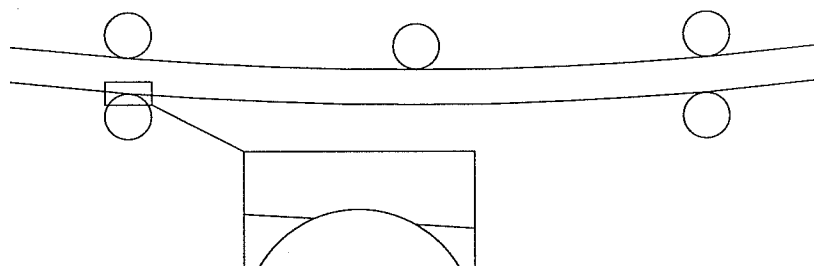
$$M_{\text{extra}} = P_m \cdot L \quad (3.2)$$

Hur stort detta moment blir beror på inspänningskraften, virkets utböjning och rullarnas placering. Normalt sett blir momentet litet och därmed mätfelet litet.



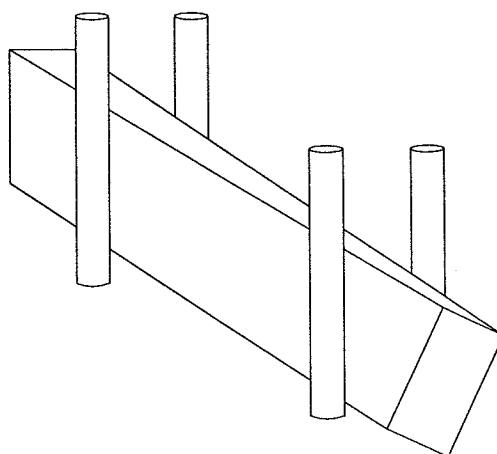
*Figur 3.1.2 Kraftspel vid rullar. Notera att figuren är kraftigt överdriven.*

Matarrullarna kan även tryckas in i virket vilket resulterar i ett fel i den uppmätta utböjningen eller kraften, se Figur 3.1.3. Den verkliga utböjningen, alternativt kraften, blir mindre än vad som ställts in, eller mätts upp.



*Figur 3.1.3 Intryckning av rullar i virket.*

Om virket är skevt är risken stor, att den av maskinen uppmätta elasticitetsmodulen blir fel. Då upplagsrullar och belastningsrulle är fast monterade kommer virkets skevhet att rätas ut, vilket innebär att det bildas inre spänningar i virket. Figur 3.1.4 visar principen av skevt virke i en maskin. De inre spänningar påverkar den totala spänningsbilden vid sorteringen och kan resultera i felaktiga mätresultat. Samson m fl (1993) visade att med skevheten  $4^\circ/\text{m}$  kan felet uppgå till 12% i den uppmätta elasticitetsmodulen.



*Figur 3.1.4 Skevt virke.*

Som tidigare nämnts är virkets dimensioner (bredd och tjocklek) faktorer som ingår vid beräkning av virkets elasticitetsmodul. Särskilt viktig är virkets tjocklek då den ingår med exponenten 3 ( $t^3$ ). I de flesta maskiner på marknaden används nominella dimensioner vid sorteringen. Så länge virket inte genomgår någon vidareförädling är problemet av akademisk natur. Men om exempelvis sågat virket sorteras, och därefter hyvlas kan sorteringen vara missvisande. Detta kan exemplifieras med ett sågat virkesstycke som har nominella tjockleken 50 mm men verklig tjocklek är 53 mm. När detta sorteras kommer elasticitetsmodulen att överskattas med nästan 20%. Så länge man använder den nominella dimensionen fungerar allt som det skall. Men, om detta virkesstycke hyvlas, och den verkliga dimensionen används vid dimensionering kommer hållfastheten att överskattas. Nämnas bör att det finns regler för hur stora dimensionsavvikelserna får vara för olika dimensioner.

Träets mekaniska egenskaper påverkas starkt av klimatfaktorer som temperatur och fukt. Både hållfasthet och styvhet sjunker när temperaturen och/eller fuktkvoten ökas. Effekten av temperatur är normalt sett liten och kan försummas. Däremot kan effekten av fuktkvoten vara av stor betydelse, Boström (1994). Ett vanligt värde på hur fuktkvoten påverkar elasticitetsmodulen är att 1% ändring i fuktkvot ger 2% ändring i elasticitetsmodul, så länge fuktkvoten är under fibermättnadspunkten. Fuktkvoten är speciellt viktig om man vid sorteringen mäter virkets dimensioner och använder dessa vid beräkning av elasticitetsmodulen. Om nominella dimensioner används vid sorteringen sker en viss kompensation i och med att virket sväller när fuktkvoten ökas, under förutsättning att fuktkvoten ligger under fibermättnadspunkten.

### **3.1.5 Referenser**

- Boström L. 1994: Machine strength grading - the influence of moisture content. Meeting of IUFRO S5.02, Sydney, Australia
- Samson M.; Bindzi I.; Fafard M. 1993: Errors caused by twist in machine stress rating of lumber. Proc. 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sept 22-24, Madison

Ko-753  
møde nr. 52  
31-05-00

## Indstilling til konsistorium om det fortsatte arbejde med en ny institutstruktur

Institutterne blev ved brev af 14. marts 00 bedt om at give en tilbagemelding om, hvordan de så sig selv indplaceret i en ny struktur med færre institutter. I forlængelse af drøftelserne på konsistoriums møde den 1. marts 00 blev der bedt om, at tilbagemeldingerne skulle indeholde en oversigt over de mulige faglige grupperinger, der naturligt vil indgå samlet i den nye struktur, og en undersøgelse af, hvilke institutdannelser der er hensigtsmæssige. Der blev åbnet mulighed for, at institutterne kunne melde tilbage, at mere omfattende undersøgelser og drøftelser ville være nødvendige, og at en endelig tilbagemelding derfor først ville kunne gives 15. juni 00. Alle institutter blev dog bedt om at melde tilbage pr. 15. maj 00.

Institutlederne har givet tilbagemeldinger, der er udsendt som Ko-749. Rektor indstiller, efter at institutsvarene har været drøftet med sektorlederne,

1. at der allerede nu kan vedtages en række institutdannelser, som tilfredsstiller kravene om faglig homogenitet og som ikke skønnes at hindre at andre faggrupper/institutter kan indgå i mere naturlige sammenhænge,
2. at der udstikkes rammer for nogle enheder, som må forventes at indgå enten som hele eller som dele af institutter i den kommende struktur,
3. samt, at der med udgangspunkt i de allerede besluttede rammer fortsættes drøftelser mellem institutter, sektorledere og rektorat om færdiggørelse af den kommende institutstruktur med henblik på at nå en afklaring inden junimødet i konsistorium, og endelig
4. at det konstateres, at diplomingeniøruddannelsen ikke (bla. under hensyn til det kommende generationsskifte) fortsat kan understøttes af særlige diplominstitut, men at uddannelsen må sikres gennem indretning af ledelsen af uddannelserne.

De rammer, der indtil videre tegner sig, angives sektorvis sammen med de muligheder, der tegner sig på tværs af sektorerne. Der er ikke medtaget de faglige betragtninger, som de enkelte institutter er fremkommet med. For disse henvises til institutledernes høringssvar. Beskrivelserne er af hensyn til overskueligheden ikke helt udtømmende med hensyn til enkeltmedarbejdere og mindre faggrupper.

## MEP sektoren

### Institut for Mekanik og Energiteknik

Der etableres et institut med basis i fagområderne faste stoffers mekanik og fluid mekanik. Området energiteknik henregnes til dette, og instituttet forventes at bestå af de nuværende institutter FAM, ET og ISH.

Det bør overvejes, om fagområdet mekanik skulle gøres bredere, f.eks. ved en sammenlægning med byggeområdets mekanik og strømningsmekanikken fra henholdsvis BKM og ISVA.

### **Området produktion, produktudvikling, konstruktion og ledelse.**

Der har været ført drøftelser mellem IPT, IKS og AKP om et institutsamarbejde, og to modeller har især været på tale, nemlig enten en integration af alle tre institutter, eller en model, hvor alene IKS og AKP fusionerer. Dertil kommer, at der har været afholdt drøftelser med MIC om en integration (baseret på ønsket om at styrke områder som miniaturisering og mikromekanisk produktion og konstruktion (et område, der dog også trækker på kompetencer bl.a. på FAM)).

ITS har fremført, at man kunne overveje en sammenslutning af ITS og IPT. For en sådan løsning taler, at ITS' fagområder (i det væsentlige arbejdsmiljø og økonomi) i princippet betjener alle DTUs uddannelser, og det ønskes at styrke disse to områders muligheder for et mere direkte samarbejde med de tekniske miljøer, ligesom økonomiområdet på DTU ønskes gjort mere virksomhedsrettet.

## **BMP sektoren**

### **Det byggetekniske område**

Der er fremført et udtalt ønske om at samle en række aktiviteter omkring byggeteknik på et enkelt institut. Kernen i dette skulle være IBE samt faggrupperne byggeproduktion og -ledelse, grafisk kommunikation, IT-byg samt byplan og byøkologi. Ønsket om denne deløsning bør kunne imødekommes, da de ønskelige konstellationer indeholder disse grupper som en samlet enhed.

### **Bygge- og anlægskonstruktionsområdet**

Dette fagområde sigter mod at behandle konstruktioner i interaktion med omgivelserne, således at man ud over at inddrage strukturelle, belastningsmæssige og materialemæssige aspekter også betragter geotekniske, geologiske, strømningsmekaniske og vandbygningsmæssige forhold. De centrale enheder er her BKM, ISVA og IGG bortset fra de to sidstes faggrupper inden for grundvand.

Det kunne overvejes, at samle disse to enheder sammen med væsentlige dele af IABM og eventuelt (dele af) ITS i et større **Institut for Byggeri og Anlæg**.

### **Området jord, vand og miljø.**

Et bredere miljøinstitut på DTU kunne bestå af IMT, samt hydrologi- og grundvandsgruppen fra ISVA og grundvandsgruppen fra IGG (eventuelt suppleret med livscykluspersoner fra IPT). En model med et udvidet 'genstandsfelt' ville være IMT samt hele ISVA og IGG.

### **Transportområdet**

Med samlokaliseringen af DTU's Center for Trafik og Transport og det nye sektorforskningsinstitut under trafikministeriet, Danmarks Transportforskning, bliver der etableret en sådan faglig sammenhæng, at det ikke vil være hensigtsmæssigt at lægge trafik ind i andre institutdannelser. CTT fortsætter derfor i princippet uændret – dog muligvis udvidet med området vejbygning

(vejvedligeholdelse). Der må dog tages stilling til, om det – jf. retningslinierne vedr. centre – skal placeres som et a eller et b-center, dvs om det skal have institutlignende status eller tilknyttes et eksisterende institut.

**Landmålergruppen fra IFP** foreslås overflyttet til IMM og enkelte medarbejdere fra **IABM** til MAT.

## **KTB sektoren**

KTB-sektoren viser en ret fuldstændig afklaring med hensyn til kommende institutstruktur. Der etableres 3 institutter

**Grundlæggende kemi (IK, OK, KEM-IFAK)**

**BioCentrum DTU/Food & Biotechnology (IM, B&E; IBT, BIO-IFAK)**

**Kemiteknik (KT, TEK-IFAK).**

Derudover foreslås et antal grundfagsmedarbejdere fra IFAK overflyttet til IMM, IPT, MAT og FYS.

## **KIM sektoren**

**Institut for elektronik og signalbehandling**

Etableres som et Ørsted-vest institut bestående af EMI, AT og ES-sektionen fra IT. IAU bliver bedt om at overveje, hvorledes de vil kunne passe ind i et institut med kerneområdet elektronik og signalbehandling.

**Institut for Matematisk Modellering og Informatik**

Etableres ved sammenlægning af IMM, computer science-gruppen på IT og landmålergruppen fra IFP.

## **TELE-COM**

Der foretages en sammenlægning af COM og TELE (inkl. CTI).

IAE anmodes om at fremkomme med forslag til, hvorledes instituttets kan indpasses under de tre foregående institutter (og eventuelt ELTEK, med hvem, der ligeledes er et fagligt overlap).

## **MAT**

MAT opretholdes som et selvstændigt institut med overførsel af medarbejdere fra diplominstitut. Institutet har selv foreslået en sammenlægning med IMM.

## **EF sektoren**

## **FYS**

FYS opretholdes som et selvstændigt institut.

**ELTEK**

ELTEK opretholdes indtil videre som et selvstændigt institut for at sikre den udviklingsproces instituttet er i gang med.

**MIC**

MIC opretholdes, jvf dog de tidligere anførte forhandlinger med IPT mv.

Med venlig hilsen

Knut Conradsen

## **3.2 Sannsynlig variasjon av registrert stivhet ved bøyebaserte styrkesorteringsmaskiner**

### **3.2.1 Bakgrunn**

Dersom det registrerte forholdet mellom kraft og deformasjon påvirkes av ytre omstendigheter (svingninger, signalfeil e.l.) vil sorteringsutfallet ikke lenger være avhengig av trevirkets bøyestivhet alene. Dette medfører at maskinen sorterer uriktig. Ved å registrere alle målepunkter for det sorterte trevirket, vil en tidvis kunne oppdage slike feilregistreringer som enkeltstående ekstremverdier. Dette fenomenet er blant annet beskrevet i [1]. Ekstremverdiene kan opptre systematisk, dvs. en finner dem igjen i samme målepunkt ved sortering av flere planker. De kan også opptre helt tilfeldig. De sistnevnte er selvfølgelig vanskeligere å avsløre.

Dersom slike enkeltstående ekstrepunkter skal elimineres, vil en komme i en situasjon hvor følgende spørsmål må besvares:

- Er et ekstrepunktet virkelig en feilmåling?
- Dersom det virkelig er en feilmåling, hvilken verdi skal en erstatte målepunktet med?

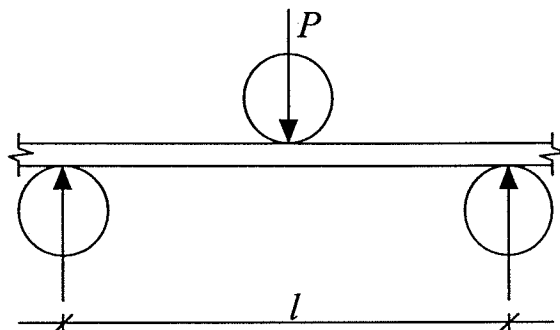
Beliggenhet av en feilverdi og den reelt kritiske sonen av en planke vil kunne ha sammenfallende beliggenhet. Ved en eventuell eliminasjon av en feilverdi kan en derfor risikere at kritisk punkt ikke registreres. Dersom det er dokumentert at feilmålinger virker til sikker side, dvs. effekten er nedgradering av virket, vil feilmålingene ikke utgjøre noen sikkerhetsrisiko. Økonomisk kan de imidlertid bety mye ved at en uforholdsvis stor andel feilaktig nedklasses. Dersom effekten av feilmålinger virker til usikker side vil det medføre en sikkerhetsrisiko.

### **3.2.2 Identifikasjon av ekstrepunkter**

Dersom ekstrepunktene skal elimineres, må de først identifiseres. Både identifisering og eliminasjon må skje under sorteringsprosessen før virkesbiten har blitt klassifisert. Med den hastighet som benyttes på maskinene, sier det seg selv at en må benytte en automatisk metode. Det prinsipp som beskrives i det følgende, bør på en enkel måte og uten alt for kostbart utstyr kunne kobles sammen med sorteringsenhetene.

### **3.2.3 Stivhetsvariasjon fra reelle defekter**

Når en planke passerer gjennom de bøyebaserte maskinene, påføres den en gitt kraft eller deformasjon. Dersom kraften holdes konstant, måles deformasjonen. Dersom deformasjonen holdes konstant måles nødvendig kraft. Forholdet mellom kraft og deformasjon settes i begge tilfeller proporsjonalt med bøyestivheten. De følgende eksempler er generalisert da de skal vise et prinsipp og ikke være en ferdig løsning for en bestemt maskintype.



Figur 3.2.1 Prinsippskisse av statisk system ved sortering. For å forenkle eksemplet lar en virkestykket være fritt opplagt uten innspenningseffekter.

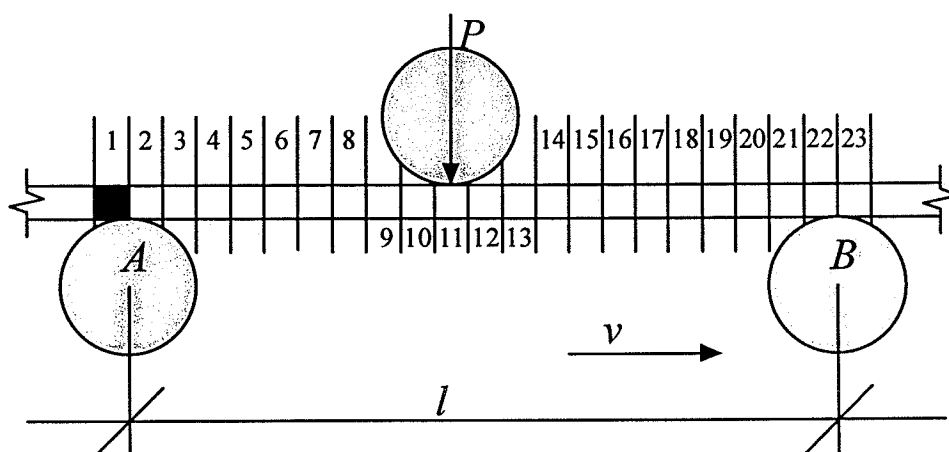
Deformasjonen under last  $P$  kan dermed uttrykkes som:

$$\delta = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot EI} = \frac{K}{S} \quad (1)$$

hvor  $K$  = konstant for den gitte dimensjon og maskintype  
 $S$  = variabel avhengig av bøyestivheten

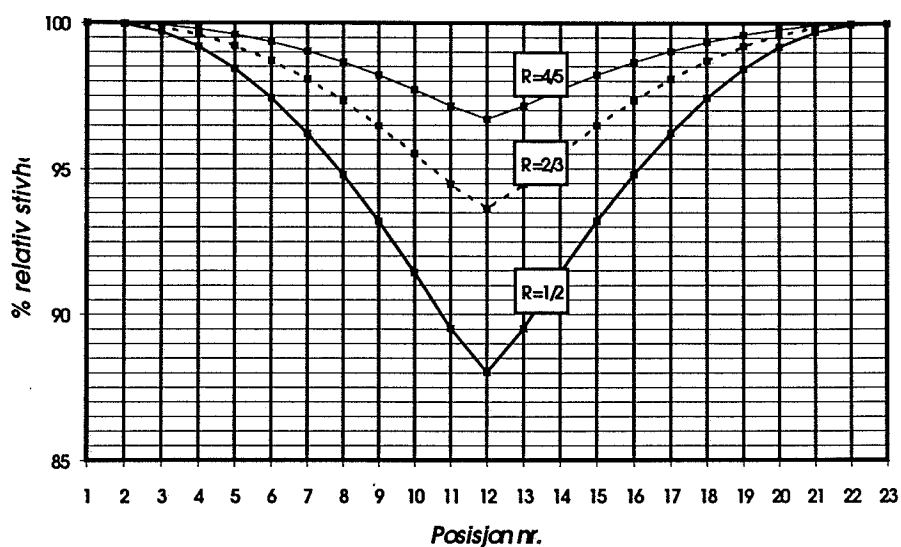
Når virkestykket passerer over rullene registreres  $S$  under  $P$  i gitte intervaller. For feilfritt/homogent virke vil  $S$  være konstant fra målepunkt til målepunkt. Dersom stivheten reduseres, reduseres også  $S$ .

### 3.2.4 Eksempel 1



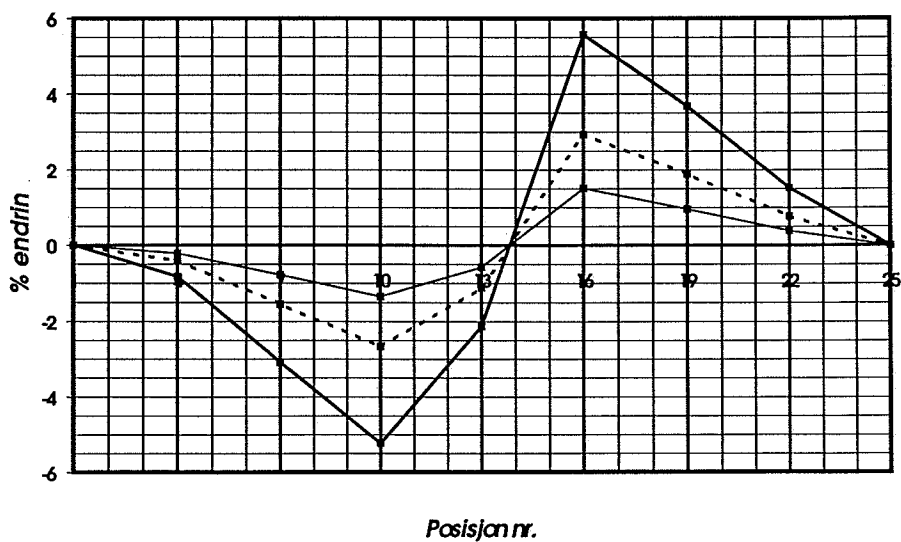
Figur 3.2.2 Virkestykke med defekt plassert i posisjon nr.1. Defektens utstrekning er i eksemplet satt til  $l/21$ .

På Figur 3.2.3 kan en se hvordan stivheten (forholdet mellom kraft  $P$  og tilhørende deformasjon registrert under  $P$ ) målt over lengden  $l$  avtar når en defekt med utstrekning  $l/21$  beveger seg innover måleområdet. 100 % stivhet tilsvarer "enhetsstivhet", dvs uten påvirkning av defekt. De forskjellige kurvene representerer forskjellige reduksjonstall for defekten.



**Figur 3.2.3** Variasjon av  $S$  som funksjon av defektens plassering og defektens størrelse.  $S$  er målt under last  $P$  over lengden  $l$ .  $R$  er forholdstallet for defektens størrelse.

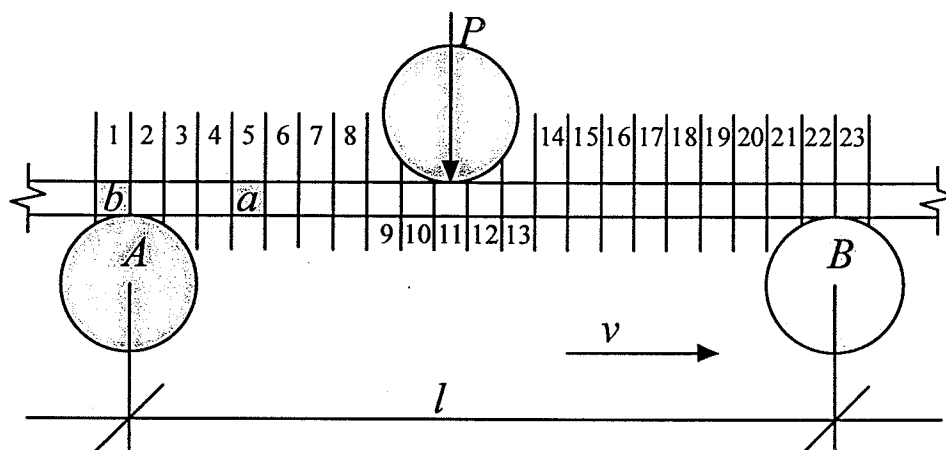
Hvor stor variasjon av stivhet en kan forvente fra et målepunkt til det neste er gitt av hvor tett maskinen foretar registreringer og hvor stor innflytelse en defekt har. Figur 3.2.4 viser % endring av stivhet i forhold til foregående målepunkt. Det er i dette eksemplet forutsatt at det gjøres én måling for hver tredje posisjon.



**Figur 3.2.4** % endring av  $S$  målt i forhold til foregående målepunkt. Det er forutsatt én måling for hver tredje posisjon. Situasjonen tilsvarende den som er beskrevet i Fig. 3.2.2 og Fig. 3.2.3.

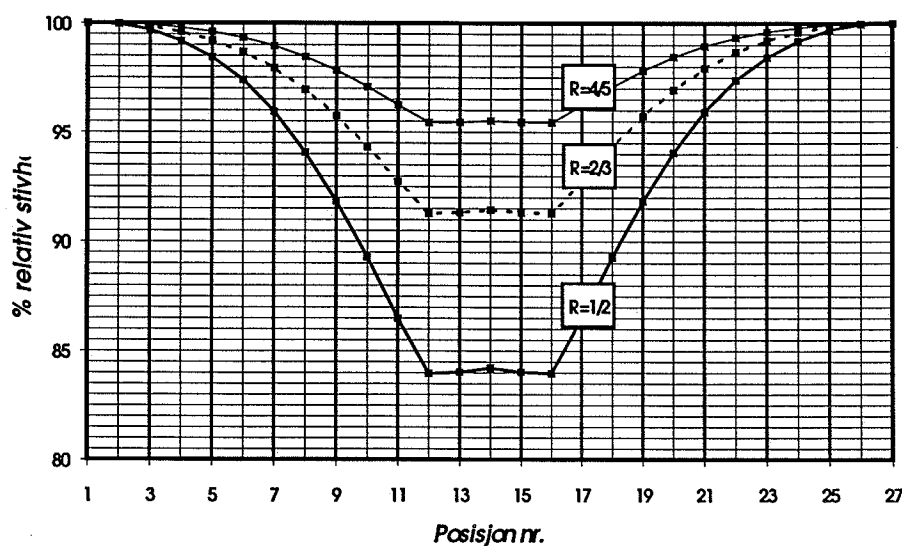
Eksemplet som er vist her, beskriver den enkleste varianten, nemlig at det opptrer én enkeltstående defekt. I virkeligheten vil defektene komme som perler på en snor med varierende senteravstand og virkning. I det følgende viser en tilsvarende stivhetsvariasjoner for en liknende variant.

### 3.2.5 Eksempel 2

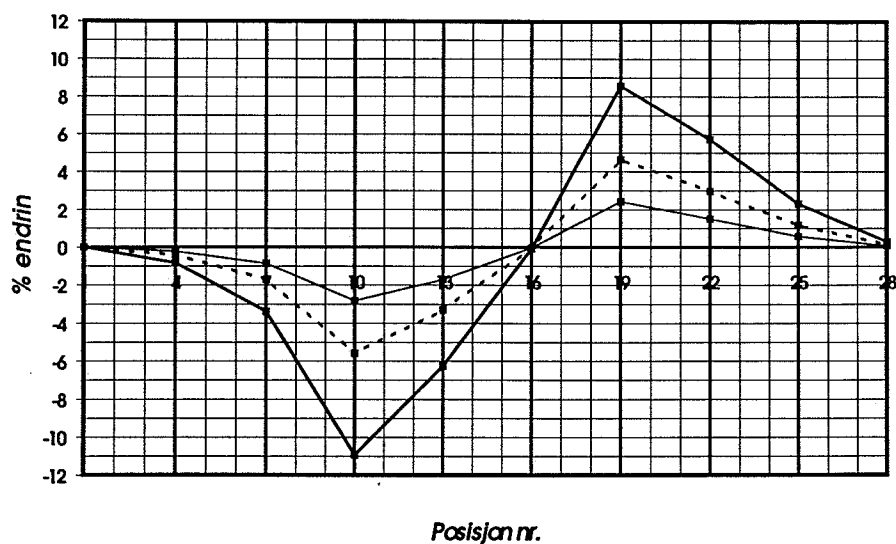


Figur 3.2.5 Virkestykke med 2 defekter plassert i posisjon nr.1 og 5. Defektene utstrekning er i eksemplet begge satt til  $l/21$ .

I Figur 3.2.6 er stivhetsreduksjonen for 3 forskjellige reduksjonstall vist. Posisjon 1 tilsvarer i Figur 5 situasjonen når defekt  $a$  er i posisjon 1. Situasjonen vist i Figur 3.2.5 tilsvarer derfor posisjon 5 i Figur 3.2.6. Begge defektene har en utstrekning lik  $l/21$ .



Figur 3.2.6 Variasjon av  $S$  som funksjon av defektene plassering og størrelse.  $S$  er målt under last  $P$  over lengden  $l$ .  $R$  er forholdstallet for defektene størrelse.



Figur 3.2.7 % endring av  $S$  målt i forhold til foregående målepunkt. Det er forutsatt én måling for hver tredje posisjon. Situasjonen tilsvarer den som er beskrevet i Fig. 3.2.5 og Fig. 3.2.6 med 2 påfølgende defekter, begge med utstrekning  $l/21$ .

### 3.2.6 Fastsettelse av øvre grense for defekt

Ved hjelp av simuleringer bør det la seg gjøre å definere "ugunstigste geometriske kombinasjon" av defekter. Likeledes bør det la seg gjøre å tallfeste realistisk lokal stivhetsforandring fra én defekt, dvs  $R$ .

En kjenner til resultater fra forsøk [2] hvor kvist som dekket en tredjedel av sidekanten kun gir 10 % reduksjon av stivheten. Dette tilsvarer  $R = 9/10$  og vil innsatt i eksempel 2 medføre en maksimal %-endring på ca. 1 % mellom 2 påfølgende målepunkter.

[3] angir et forhold mellom laboratoriemålt midlere og laveste elastisitetsmodul (egentlig stivhet) målt om svak akse gitt som:

$$MOE_{lk-midd} = 0,93 \cdot MOE_{lk-min} + 1836 \quad r = 0,91 \quad (2)$$

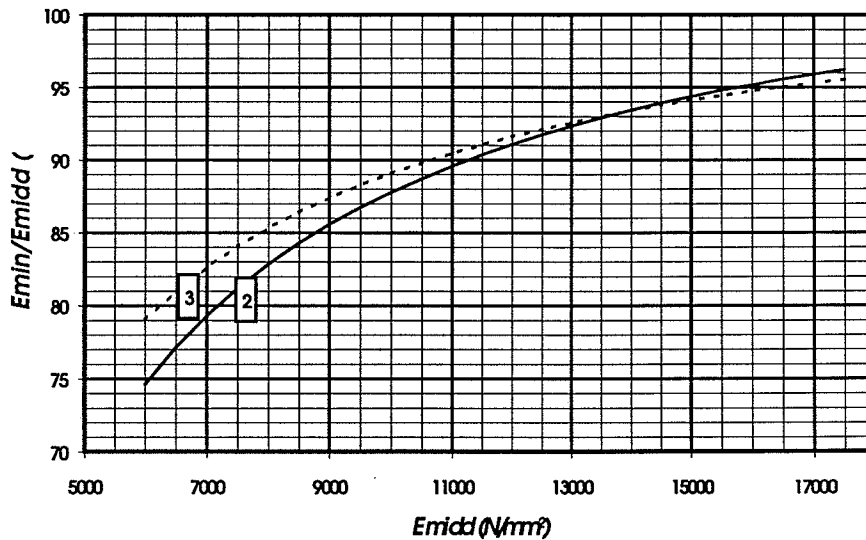
Den midlere verdien bygger på målinger gjort med cc 150 mm.

[3] angir tilsvarende forhold for korrigerte maskinregistrerte verdier (Computermatic) basert på sortering av 5600 limtrelameller:

$$MOE_{lk-midd} = 0,96 \cdot MOE_{lk-min} + 1447 \quad r = 0,91 \quad (3)$$

Figur 3.2.8 viser hvordan forholdet mellom midlere stivhet ( $E_{midd}$ ) og forventet minimums stivhet ( $E_{min}$ ) varierer som funksjon av verdi for midlere stivhet.

Hvor vidt det er formålstjenlig å benytte en konstant R-verdi eller sette denne som funksjon av  $E_{\text{midd}}$  (som kan kalkuleres for hvert virkestykke under sorteringsprosessen) bør vurderes.



Figur 3.2.8 Forholdet mellom minste og midlere stivhet som funksjon av midlere stivhet i henhold til ligning (2) og (3).

### 3.2.7 Sammendrag

Det bør la seg gjøre ved enkle hjelpemidler å eliminere enkelte feilmålinger under styrkesortering med bøyebaserte maskiner.

Dette kan gjøres på følgende måte:

1. På bakgrunn av hvilken spennvidde maskinen benytter og avstand mellom målepunkter bestemmes ugunstigste kombinasjon av defekter. (Dette vil være geometrisk bestemt.)
2. Størrelse på forventet maksimal defekt defineres.
3. Punkt 1 og 2 kombineres til å beregne størrelse av maksimal forventet forskjell fra ett målepunkt til det neste (det kan her tas en dobbelsjekk ved å gjøre beregningen i forhold til *både* foregående *og* etterfølgende punkt).
4. Størrelsen bestemt under 3 legges inn i styringsenheten som en maksimal grenseverdi. Registreringer utover denne verdien settes lik grenseverdien.

### 3.2.8 Litteratur

- [1] Falk .R. H., Solli K. H., Aasheim E.: "The performance of glued laminated beams manufactured from machine stress graded Norwegian spruce" (Meddelelse nr. 77, Norsk Treteknisk Institutt 1992)
- [2] Solli, K. H. "Glimt fra kanadisk forskning innen maskinsortering" (Artikkel i Treteknisk Informasjon nr. 3/1992)
- [3] Solli, K. H. "Nordisk samkalibrering av styrkesorteringsmaskiner" (Nordtest Technical Report 210, Norsk Treteknisk Institutt)

### 3.3 Optisk detektering av kvistar och andra karakteristika på sågade eller hyvlade trätor

#### 3.3.1 Innledning

Vid framställningen av virke sönderdelas trädet i olika steg. Det virkesstycke som används som t ex del i ett fönster eller som regel i en vägg har granskats i olika led i processen och slutligt sorterats till sitt ändamål. Sorteringen styrs av olika användningars krav och betalningsförmåga. Ett exempel på sådant krav är att med tillräcklig säkerhet garantera en viss nivå på virkesstyckets hållfasthet.

Genom trädens varierande växt med anläggande och utväxande av grenar blir varje träd en individ med särskild fiberstruktur. En gren är anlagd vid trädets märke. När trädet växer får anlaget (kvisten) inne i trädet en form liknande ett kohorn med spetsen nedåt och inåt mot märken. När vi genom trädet vid sågningen gör plana parallella snitt genom "kohornen" kommer dessa att synas på det sågade virkets yta som sågytekvistar i olika former. (Formerna går vid matematisk representation, t ex i samband med automatisk sortering, bra att approximera genom att kombinera olika snitt genom stympade räta, cirkulära koner).

Många viktiga parametrar i kundens krav på ett virkesstycke är direkt kopplade till en människas synintryck av dessa sågytekvistar dels estetiskt och dels genom igenkänning av t ex svartkvist som kan vara oönskad av skäl som krav på spackling eller lagning. På likartat sätt som virke visuellt sorteras för olika snickerianvändningar sorteras virke visuellt med avseende på hållfasthet.

För hållfasthetssortering betraktas densitet och fiberstruktur som de kanske viktigaste parametrarna. Hållfastheten i ett snitt hos ett virkesstycke bedöms då av tradition via ett framtaget regelverk för sågytekvistars läge och storlek på flat- och kantsidor, ibland har även kvistars form betydelse.

Generellt gäller att en stor del av den information som vid visuell sortering nås av ögat hos sorteraren också kan uppfattas av en kamera. Kamerateknik utnyttjas sedan snart 20 år för att för snickeriändamål automatiskt sortera virkesstycken.

Synliga företeelser på en virkesyta är dels *karakteristika* som sågytekvistar och kådlåpor och dels defekter framkomna genom t ex vår hantering av virket som sprickor eller dubbskador. Inom europastandardiseringen rörande virkeskvalitet används nu det generella neutrala begreppet "features" för alla synliga företeelser. Med kännedom om hur dessa kohorn normalt är utvecklade inne i en *stock* går det att efter optisk avsökning av *stockens* yta via postningen göra en prognos på form och läge hos sågytekvistarna på de sågade *virkesstyckena* [9], [10].

Vid den optiska automatiska sorteringen utnyttjas befintliga sorteringsregler. Kunderna formulerar sina krav relativt dessa. I ett nordiskt projekt utarbetas ett *kvalitetsspråk* som skall vara generellt och kunna, helt oberoende av eventuella sorteringsklasser, utnyttjas för mycket specifik kundanpassning. Språket skall nu prövas bl a mot automatisk sortering. Det är ju kundens dator och sågverkets dator som skall vara överens.

Vad gäller hållfasthetssortering har kunden/användaren egentligen inte med sorteringen att göra. Sorteringen är en sak mellan en myndighet, som representerar samhället och brukarna, och sågverket. För denna myndighets del får brädorna se ut hur som helst bara dom ger virke med minst ett visst karakteristiskt värde på momentkapaciteten.

### **3.3.2 Metoder**

#### **3.3.2.1 Kameror (princip och prestanda)**

Kamerateknik utnyttjas sedan snart 20 år för att för snickeriändamål automatiskt sortera virkesstycken. Helt dominerande teknik är en kamera i form av ljuskänsliga givare (sensorer) monterade i rad. Mot raden av givare projiceras en bild av virkesstycket genom en lins. Givarnas tillstånd söks av i hög hastighet. Vi får en digital representation av virkesytan med läge och intensitet (gråskala) registrerad. Signalen filtreras och behandlas genom algoritmer till beslut t ex om att här finns en kvist med viss form och storlek. Olika algoritmer kan behövas för detektering av olika karakteristika eller defekter.

Sammaamerateknik kan utnyttjas också för virkesstyckets mått och form.

Den vanligaste givaretypen är s k charged coupled device (CCD) som består av halvledarkomponenter (givare) som urladdas av ljus. Före avsökningen laddas alla enheter (här lika med pixels) fullt. Belysningen sker och ger en urladdning proportionell mot ljusstyrkan. Givarnas kvarvarande spänning avsöks och ger pixel för pixel ett digitalt värde på en gråskala.

CCD-kameran kan vara en linje med givare. Vanligtvis 1024 i rad. En linje är en relativt sett billig utrustning som passar för material som med noggrann styrning kan transporteras förbi "linjen". CCD-kameran kan också vara en matris, vanligen med 512x 512 pixels.

För hållfasthetssortering där kvistars och kvistgruppers exakta läge utmed virket kan vara av mindre betydelse skulle en form av zoomning kunna vara intressant. Zoomfunktion utnyttjas veterligen inte i något kommersiellt system. Med zoomning skulle man först snabbt kunna söka av hela virkesytan, finna de intressanta delarna och sedan mer koncentrerat söka av kvistar och kvistgrupper.

CTBA söker samarbetspartner för utnyttjande av nyutvecklade givare [7].

#### **3.3.2.2 Färg - svart-vitt**

Färgavläsning kan också utnyttjas [6] , [13]. Färginformationen förbättrar besluten. Kvistarna och de andra "features" på virkesytan varierar inte bara i läge och form utan även i färg. I ett svart/vitt system ger färgen olika gråtoner. I ett avsökningssystem som tolkar också färgspektrum från t ex kvistarna kan man nå en mycket hög diskriminering hos karakteristika, se [6] och [13].

### 3.3.2.3 Bildbehandling

För att göra informationsmängden hanterbar måste i ett första steg signalen komprimeras (eng=preprocessing). Komprimeringen sker med ett särskilt program, en komprimerings-algoritm. Den stora delen av den avsökt ytan har ju normalt inget intressant att rapportera. Komprimeringen betyder mycket för den vidare analysen. Programmet som sedan analyserar den komprimerade information är också en algoritm (algoritm = räkneregel). De algoritmer som hittills utnyttjats har haft existerande sorteringsregler för snickerivirke som bas. Det är möjligt att andra algoritmer kan ge bättre beslut när det gäller hållfasthetsortering. Blå måste kanske virkets kant och flatsidor beaktas mer i samverkan. Grundbok för bildanalysen är [2]. Fraunhofer-Institut söker samarbetspartner gällande nya utvärderingsmetoder [8].

Bildbehandling kräver stor datorkapacitet men detta är i dag inte en begränsande faktor.

### 3.3.2.4 Utvärdering av data

Signalen bearbetas alltså i ett första steg till hanterbar information. Det gäller sedan att besluta vilken typ av företeelse som har lästs av. Ett sätt att bearbeta signalen är att göra ett histogram över gråtonernas fördelning. Olika karakteristika kan då få typiska histogram. Parametrar som beskriver histogrammets form t ex en relation mellan spridning och medelvärde kan utnyttjas för beslutet om typ dvs svartkvist etc. ([1] och [11]).

Labeda [1] hanterar i ett steg mellan komprimeringen och den vanliga vidare bearbetningen en kompensation för systematiska fel som t ex ojämn belysning.

Ett sätt att ge datorn sorteringsregler är genom "inlärning". För inlärningen utnyttjas program som kallas *neurala nätverk*. Namnet kommer från uppbyggnaden som primitivt liknar neuroner i den mänskliga hjärna dvs noder med kontakter med många närliggande lika noder i ett nätverk. Vid inlärningen låter man t ex 100 virkesstycken passera maskinen. Maskinen läser in, bearbetar och lagrar ett antal parametrar för varje plank till sammans med operatörens uppfattning om den. Redan efter ett fåtal passerade virkesstycken kan datorn göra ett förslag till sortering. Ett större antal representativa virkesstycken ger eftersom en allt noggrannare automatisk sortering. Inför en ny situation med nya önskemål och ett i princip okänt virkesparti i väntan på sortering kan det vara stora svårigheter att hitta ett representativt urval för inlärningen. Se [1] och [12].



Figur 3.3.1 Histogram (scatterplot) med olika karakteristika där typens läge kan vara stöd för diskrimineringen mellan blånad och kvist ([4], Paper D, figur 13 sidan 11).

### 3.3.3 Möjligheter, svårigheter

Optisk automatisk sortering fungerar för såväl sågade som hyvlade virkesytor. Större sprickor är lätta för de optiska systemen att finna även på ej hyvlade ytor. En luddig yta ger sämre noggrannhet.

Olika *träslag* visar sig naturligtvis olika. Både för barrträ och lövträ finns tekniken utnyttjad. Tekniken fungerar ännu inte för att bestämma vilket träslag ett virkesstycke är av. Särskilt vore önskvärt att kunna skilja liknande arter som furu, gran eller lärk åt. Träslagsbestämning med bildtolkning och neurala nätverk finns av TRADA föreslaget som projekt inom Eurowood [15].

Varje installation av ett automatiskt sorteringssystem kräver anpassning efter lokala förhållanden. Säkra utvärderingsmetoder för maskinernas prestanda saknas. I [5] redovisas försök med objektiv utvärdering. Maskinens beslut (klassning) gällande karakteristika och defekter måste ha en hög repeterbarhet. I varje virkesparti finns individer som är svåra för maskinen att upprepat sortera rätt. Alltså får man ta de optimistiska sammanfattningarna i diverse rapporter med en nypa salt. Ett annat bekymmer och anledning till gråa hår hos maskinleverantörerna vad gäller utvärderingen är att de visuella sorteringsreglerna idag i sig är diffusa och visar stora möjligheter till subjektivitet.

### 3.3.4 Litteratur

En omfattande litteraturlista finns i [3]. [14] är en synnerligen omfattande bibliografi över hela området med optisk maskinell avsökning.

- [1] Labeda, Andrzej 1993. Practical Implementations of Cognitive Processing Methods in Wood Scanning. ScanPro -93
- [2] Gonzales R.C. ; Woods R.E. 1992. Digital Image Processing ISBN 0-201-50803-6 (Träteks bibliotek T2-59)
- [3] Åstrand Erik 1992. Detection and classification of surface defects in wood. A preliminary study LiTH-ISY-I-1437.
- [4] Hagman P.O.G. Prediction of Wood Quality Features by Multivariate Models based on Scanning Techniques. ISSN - 0280 - 8242.
- [5] Lycken A. ; Uusijärvi R. ; Hagman O.; Åstrand E. 1994. Automatoptimering av sågat virke, Träteks
- [6] Brunner et al. 1993. Enhancing color-image data for wood-surface feature identification. Proceedings ScanPro
- [7] Development of neural and fuzzy concepts to artificial vision for wood inspection CORDIS

- [8] Fuzzy classification of surface quality criteria. CORDIS
- [9] Lee, Samuel C.; Qian, Gen-Sheng; Chen, Jan-Bo; Sun, Yi-Wei; Hay, Douglas A. 1991. Determining a maximum value yield of a log using an optical log scanner. Proceedings IEEE Computer Society Conference, ISBN: 0-8186-148-6: 747-748
- [10] Occena, Luis G.; Tanchoco, Jose M. A. 1989. Pattern directed extraction and characterization of defect configurations in solid log models, Artificial Intelligence in Engineering 4(3):144-154
- [11] Sobey, P. J.; Semple, E. C. 1989. Detection and sizing visual features in wood using tonal measures and a classification algorithm, Pattern Recognition 22(4):367-38 ISSN: 0031-3203
- [12] Kothari, R.; Klinkhachorn, P.; Huber, H.A. 1991. A neural network based histogrammic procedure for fast image segmentation, Proceedings of The Twenty-Third Southeastern Symposium on System Theory pp.203-6
- [13] GreCon Superscan Color, International Woodworking Fair 1994, Atlanta, Georgia, USA
- [14] 1982-1992 Bibliography of Machine Vision Technical Resources, Machine Vision Association/Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI 48121, USA, 125 pp.
- [15] Eurowood, Brokerage Event, London 1995.

### **3.4 Nær-infrarød reflektionsspektroskopis anvendelse ved styrkesortering**

#### **3.4.1 Indledning**

Nær Infrarød Reflektionsspektroskopi (NIR) er en teknik til ikke-destruktiv evaluering af organiske materialer. Når sådanne materialer udsættes for nær infrarødt lys (700-3000 nm), vil noget af strålingen absorberes i materialet, mens resten vil reflekteres. Forholdet mellem absorberet og reflekteret lys afhænger af den kemiske og fysiske sammensætning af materialet. Det er især molekulære bindinger af typen -CH, -OH og -NH, der er følsomme. Sådanne bindinger har sine individuelle bølgelængder, hvor særlig stor absorption forekommer. Gennem kvantificering af antallet af bindinger af en bestemt type kan der derfor opnås viden om vandindhold, mængden af cellulose etc. Grundlaget for NIR er kvantificeringen af absorptionen ved de relevante bølgelængder. I praksis måles reflektionen (R) og absorptionen udregnes derefter af  $A = \log(1/R)$ .

En kort oversigt over NIR teknikken og den dertil hørende analyse og kalibreringsteknik fås f.eks. i Thygesen [1994].

#### **3.4.2 Instrumentering**

Den grundlæggende opbygning af et NIR instrument består af en lyskilde, et filter, der giver lys af én bølgelængde (monokromator) samt en detektor, der registrerer hvor stor en del af det udsendte monokromatiske lys, der reflekteres. Normalt er der behov for signaler fra mere end én bølgelængde, og moderne instrumenter er da også istand til at udsende og registrere lys af mange bølgelængder. Filterinstrumenter arbejder med op til 20 forskellige roterende filtre, der skiftevis bringes ind i lysstrålen for at frembringe den ønskede bølgelængde. Scannende instrumenter kan arbejde med mere end 1200 bølgelængder i ét scan. En måling af et sådant omfang gennemføres på under ét sekund.

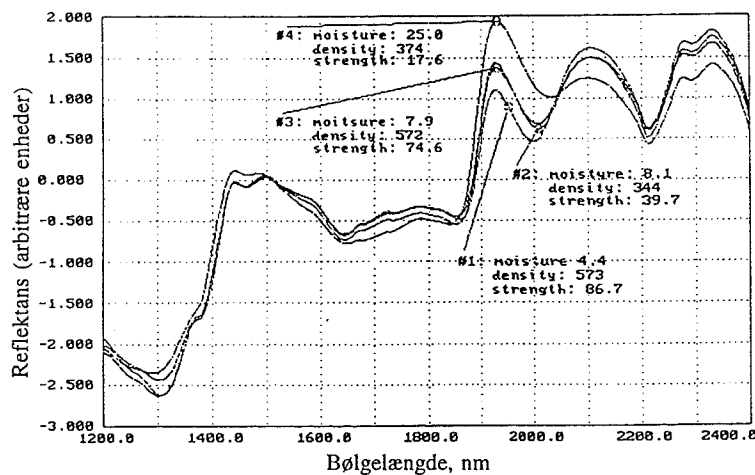
Der er i dag en rivende udvikling i gang indenfor NIR instrumenter, og det må forventes, at måle hastighed og præcision yderligere forbedres i den nærmeste fremtid. Et scanning instrument fås for ca. 500.000 DKK til 700.000 DKK. Et filter instrument med 15-20 filtre koster ca. 200.000 DKK, mens et instrument med filtre til 2-3 bølgelængder fås for ca. 20.000 DKK.

En oversigt over NIR instrumenter ses i Workman & Burns [1992]. Williams [1987] omtaler design af et større antal kommercielle NIR instrumenter, og de seneste forbedringer er beskrevet af Kemmeny [1992].

NIR-teknikken er begrænset til måling på materialers overflade. For træ må påregnes en maksimal måledybde af størrelsesorden 1 mm. Imidlertid gør moderne fiberoptik det muligt at udforme sonder med få millimeters diameter, der kan bringes ind i træ via borede huller. Ved hjælp af fiberoptik gøres NIR instrumentet endvidere meget fleksibelt, idet der kan tolereres stor afstand mellem målepunkt og NIR-apparat. Endvidere gør fiberoptik det muligt at anvende mange målepunkter for det samme instrument.

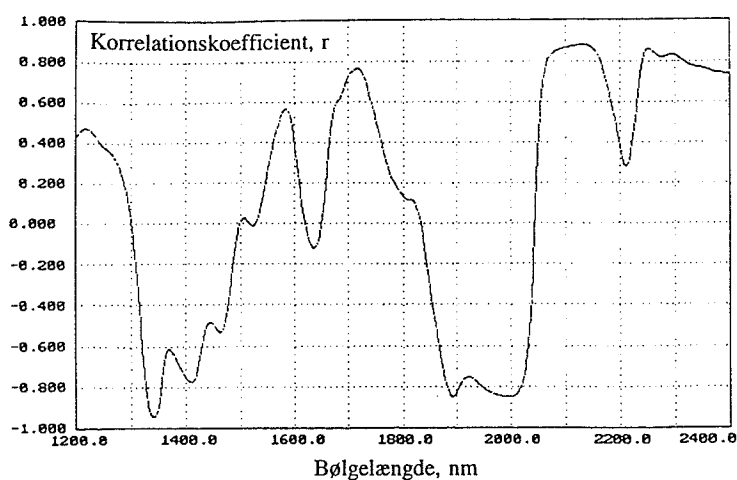
### 3.4.3 Analyseteknik

Et typisk resultat af en NIR analyse af træ ved hjælp af et scannende instrument ses i Figur 3.4.1, hvor 4 træprismer med forskellig densitet og vandindhold er målt ved 1201 bølgelængder i området fra 1200 nm til 2400 nm. Det ses, at der ved visse bølgelængder



Figur 3.4.1 Spektre fra 4 træprismer målt med NIR teknik på endetræ (20x20 mm) [Pedersen et al. 1993].

(f.eks. 1500 nm) ikke er nogen forskel på reflektansen for de 4 prøver, mens der for andre bølgelængder (f.eks. 1930 nm) er en forskel, der tydeligt afspejler variationen i vandindhold og densitet. De enkelte bølgelængders evne til at bedømme en bestemt egenskab varierer således, hvilket er illustreret i Figur 3.4.2. Her er 75 træprismers trykstyrke bestemt, efter at disse først var bedømt med et scannende instrument. For hver bølgelængde er korrelationskoefficienten for sammenhængen mellem reflektans og trykstyrke angivet, og det ses, at denne varierer fra  $r = -0,95$  til  $r = 0,90$ .



Figur 3.4.2 Korrelationskoefficientens afhængighed af bølgelængde for trykstyrken af 75 prismer af fejlfri rødgran (*Picea abies*).

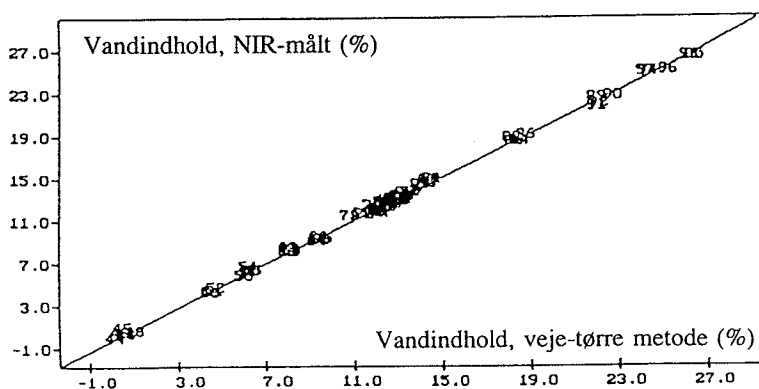
Som regel giver reflektansen ved en enkelt bølgelængde ikke tilstrækkelig sikker information om den egenskab, der ønskes estimeret, og i tilfælde, hvor flere egenskaber varierer (ex. densitet og vandindhold) er én bølgelængde under alle omstændigheder utilstrækkelig. Der vil derfor være behov for at etablere modeller, hvori indgår signaler fra et større antal bølgelængder. For filterinstrumenter med 15-20 bølgelængder vil det normalt være tilstrækkeligt at anvende almindelig multipel regression til etablering af en model. For et scannende instrument med 1200 bølgelængder hvor disse typisk er indbyrdes afhængige, er en sådan fremgangsmåde imidlertid umulig. Her må anvendes mere raffinerede statistiske metoder som f.eks. "Principal Component Regression (PCR)" eller "Partial Least Squares Regression (PLSR)". En kort oversigt over den principielle fremgangsmåde findes beskrevet i [Thygesen 1994], mens en udtømmende behandling findes i [Martens & Næs 1989].

Med det scannende instruments meget store antal måleresultater og med den deraf følgende store uoverskuelighed er anvendelsen af neurale netværk oplagt (se afsnit 3.8). Dette område er under kraftig udvikling, og kan for NIR området eksempelvis findes beskrevet i [Borggaard & Thodberg 1992].

#### 3.4.4 NIR's potentiale ved styrkesortering

NIR teknik er i dag meget anvendt især indenfor landbrug, fødevarerindustrien og den farmaceutiske industri. Teknikken anvendes eksempelvis til kvantificering af protein, stivelse og fedt. Den finder anvendelse både i forbindelse med lejlighedsvis kvalitetskontrol og med den rutinemæssige produktionsovervågning.

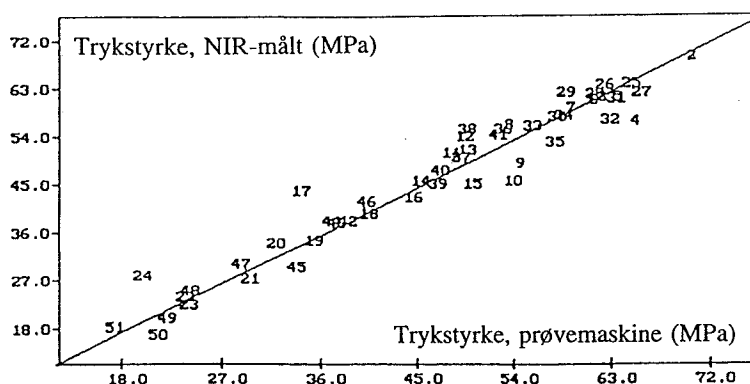
Indenfor træområdet anvendes NIR instrumenter i dag rutinemæssigt til måling af vandindhold i træfibre og træflis ved produktion af MDF plader og spånplader. Der er tale om fabrikater af eksempelvis mærker "Quatra Beam" og "Infrared Engineering". Sammenhængen mellem NIR og vandindhold i massivt træ er demonstreret af Pedersen et al. [1993]. Figur 3.4.3 illustrerer sammenhængen mellem NIR-modellen og det målte vandindhold for 127 træprismer konditioneret til forskellige vandindhold under fibermætningspunktet. Der opnåedes en forklaringskoefficient (forklaringskoefficient) på  $r^2 > 0,99$ .



Figur 3.4.3 Sammenhæng mellem vandindhold bestemt ved NIR metoden og det målte vandindhold for 127 træprismer (*Picea abies*) [Pedersen et al. 1993].

Andre anvendelser indenfor træområdet er også undersøgt. NIR er benyttet til bestemmelse af det kemiske indhold af tørt træpulver [Mroczyk et al. 1992; Schultz & Burns 1990]. NIR's potentiale ved karakterisering af træpulp er demonstreret [Birkett & Gambino 1989; Easty et al. 1990; Wallbäcks et al. 1991 a and b]. NIR er anvendt til identifikation af træart [Nair & Lodder 1993] og til bedømmelse af fibervinkel [Tsuchikawa et al. 1992]. Herudover er muligheden for identifikation af råd demonstreret [Pedersen et al. 1993].

Ved styrkesortering af konstruktionstræ er især 2 parametre af afgørende betydning, nemlig knaststørrelse og styrke af det fejlfrie træ. Sidstnævnte parameter fastlægges normalt ved bestemmelse af densiteten, men da også denne størrelse er vanskelig at måle, anvendes som regel årringsbredden som vikarierende parameter. I [Pedersen et al. 1993] demonstreres i to uafhængige forsøg en overbevisende sammenhæng mellem trykstyrke af fejlfrit træ bestemt ved NIR metoden og den sande trykstyrke ( $r^2 > 0,90$ ). Figur 3.4.4 viser denne sammenhæng for 81 prismar af rødgran (*Picea abies*). I samme undersøgelse er NIR metoden forsøgt anvendt til bestemmelse af styrke af konstruktionstræ. For hver af 57 planker af rødgran blev foretaget en NIR måling på den ene endeflade og plankernes bøjningsstyrke blev bestemt.



Figur 3.4.4 Sammenhæng mellem trykstyrke målt ved NIR metoden og sand trykstyrke [Pedersen et al. 1993].

For konstruktionstræ må forventes en mere beskeden korrelation til bøjningsstyrken, idet knasters betydning som regel er af samme størrelsesorden som densitetens betydning. Ved konstruktionstræ af lav kvalitet er knasters betydning lidt større end densitetens, mens det omvendte er tilfældet ved konstruktionstræ af høj kvalitet. NIR analysen resulterede i det aktuelle tilfælde i en sammenhæng med bøjningsstyrken udtrykt ved  $r^2=0,29$  og en standardafvigelse for regressionen på 3,5 MPa.

For de samme prøver giver årringsbredde, densitet og elasticitetsmodul (højkant) forklaringskoefficienter på henholdsvis  $r^2=0,24$ ,  $r^2=0,25$  og  $r^2=0,59$ . De tilsvarende standardafvigelser er henholdsvis 4,8 MPa, 4,8 MPa og 3,5 MPa.

På basis af ovenstående må NIR således ses som et potentielt alternativ til bestemmelse af årringsbredde/densitet ved styrkesortering. Der kan bl.a. blive tale om anvendelse på følgende 2 forskellige niveauer:

1. Såfremt det lykkes at etablere en sammenhæng mellem NIR og styrke på basis af nogle få bølgelængder, vil den tilsvarende instrument pris på 20-30.000 DKK muliggøre anvendelse af NIR som *supplement* ved visuel sortering. Hermed ville det bl.a. igen blive muligt visuelt at sortere "vanskelige træarter" som f.eks. sitka gran fra det norske Vestland.
2. NIR måling bringes i anvendelse ved egentlig maskinel styrkesortering, hvor selve knastmålingen sker v.h.a. et andet optisk system som f.eks. halvlederkamerateknik kombineret med mønstergenkendelse.

NIR teknikkens problem er, at den ikke kan baseres på en enkelt måling af hvert stykke konstrukstræ. Ved en måling på endetræ vil man ganske vist få et gennemsnit af densiteten i høst og vårved, men man risikerer, at der i tværsnittet sidder knaster, der gør målingen ikke-repræsentativ. Ved måling på sidetræ derimod vil man risikere ved en enkelt måling udelukkende at måle på høstved eller udelukkende på vårved. En industriel anvendelse vil således forudsætte et antal målepunkter, der gør resultatet repræsentativt. Dette vil kunne opnås enten ved at "multiplekse" signalet til NIR instrumentet ved hjælp af et større antal lyslederfølere eller ved at foretage et "liniescan" i et passende antal tværsnit af en planke, der passerer forbi en følerenhed.

### 3.4.5 Konklusion

Nær-infrarød reflektionsspektroskopi (NIR) er en berøringsfri metode til bedømmelse af træs egenskaber. Metoden menes at have potentiale til estimering af styrken (densiteten) af den fejlfrie del af en planke af konstrukstræ. Den kan dermed erstatte metoder til bedømmelse af årringsbredde og densitet. Det er endvidere sandsynligt, at metoden kan bringes til at estimere den generelle fiberhældning af træ ligesom det må forventes at NIR kan afsløre reaktionsved og råd.

### 3.4.6 Litteratur

Borggaard, C.; Thodberg, H.H. 1992: Optimal minimal neural interpolation of spectra. *Analytical Chemistry* 64:545-551.

Easty, D.B.; Berben, S.A.; DeThomas, F.A.; Brimmer, P.J. 1990: Near-infrared spectroscopy for the analysis of wood pulp: quantifying hardwood-softwood mixtures and estimating ligning content. *Tappi Journal* 73(10):257-261.

Hoffmeyer, P. 1990: Failure of wood as influenced by moisture and duration of load. Doctoral dissertation. State University of N.Y., College of Environmental Sci. and Forestry, Syracuse.

Hoffmeyer, P.; Pedersen, J.G. 1994: Evaluation of density and strength of Norway spruce by near-infrared reflectance spectroscopy. *Proceedings of the First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood*. Sopron, Ungarn.

- Kemmeny, G.J. 1992: Process Analysis. *In*: Burns, D.A.; Ciurczak, E.W. (eds.): Handbook of Near-Infrared Analysis. Marcel Dekker, Inc. New York. 681 pp.
- Martens, H.; Næs, T. 1989: Multivariate calibration. John Wiley & Sons.
- Mroczyk, W.B.; Kasprzyk, H.; Gaweck, T. 1992: The application of NIRS for the determination of the composition of wood samples of *Fagus silvatica*. pp. 566-568. *In*: Murray & I.A. Cowe, (eds.): Making Light Work: Advances in Near Infrared Spectroscopy. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Nair, P.; Lodder, R.A. 1993: Near-IR Identification of Woods for Restoration of Historic Buildings and Furniture. *Applied Spectroscopy* 47(3):287-291.
- Pedersen, J.G.; Hoffmeyer, P.; Jacobsen, U.G.; Reffstrup, T. 1993: Non-destructive evaluation of wood by near-infrared reflectance spectroscopy. Bioteknologisk Institut, Kolding. Rapport nr. 93-1-1. ISSN 0906-8465.
- Schultz, T.P.; Burns, D.A. 1990: Rapid secondary analysis of lignocellulose: comparison of near-infrared (NIR) and fourier transform infrared (FTIR). *Tappi Journal* 73(5):209-212.
- Thygesen, L.G. 1994: Indirect methods for determination of dry matter density and basic density of pulp wood. Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTU Teknisk Rapport 310/94. ISSN 0908-3871.
- Tsuchikawa, S.; Hayashi, K.; Tsutsumi, S. 1992: Application of NIRS to wood. pp 569-576. *In*: Murray & I.A. Cowe, (eds.): Making Light Work: Advances in Near Infrared Spectroscopy. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Wallbäcks, L.; Edlund, U.; Nordén, B.; Iversen, T. 1991a. Multivariate characterization of pulp. Part 1. Spectroscopic characterization of physical and chemical differences between pulps using  $^{13}\text{C}$ , CP/MAS, NMR, FT-IR, NIR and multivariate data analysis. *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 6(2):74-80.
- Wallbäcks, L.; Edlund, U.; Nordén, B.; Iversen, T. 1991b: Multivariate characterization of pulp. Part 2. Interpretation and prediction of beating processes. *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 6(3):104-109.
- Williams, P.C. 1987: Commercial Near-Infrared Reflectance Analyzers. *In*: Williams, P.; Norris, K. (eds.): Near Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. American Association of Cereal Chemists. 330 pp
- Workman, J.J.; Burns, D.A. 1992: Commercial NIR Instrumentation. *In*: Burns, D.A.; Ciurczak, E.W. (eds.): Handbook of NIR Analysis. Marcel Dekkers, Inc., N.Y. 681 pp.

### 3.5 Elasticitetsmodul från resonanta vibrationer som sorteringsparameter

#### 3.5.1 Inledning

Många material uppvisar en statistisk korrelation mellan vissa typer av elastiska parametrar och hållfasthet. Sambandet mellan elasticitetsmodul och kubhållfasthet hos betong och sambandet mellan skjuvmodul och skjuvhållfasthet hos lera är välkända exempel på detta. Inom träsektorn har ett statistiskt samband mellan elasticitetsmodul bestämd genom statisk böjprovning på lågkant och böjhållfasthet vid brottprovning genom böjning på högkant använts under ett par decennier som grund för maskinsortering av hållfasthetsklassificerat konstruktionsvirke. En begränsad förmåga hos sådana statistiskt böjande hållfasthetssorteringsmaskiner har medfört ett intresse av att finna alternativa principer.

Möjligheten att bestämma elasticitetsmodulen hos virke genom dynamisk provning diskuterades tidigt, se t ex Goens (1931) och Kollmann & Krech (1960). Tekniken har på senare tid fått förnyat intresse, framförallt på grund av två faktorer. Dels har mättekniken som är associerad med dynamisk provning utvecklats starkt, dels medförde upptäckten av den snabba Fouriertransformen [Cooley & Tukey 1965], att dynamiska strukturegenskaper kan etableras genom relativt effektiva datorbaserade beräkningsalgoritmer, jfr Ewins (1984). Exempel på tillämpning av modanalys ges av Enochson (1985). Två arbeten som visar på detta nya intresse för dynamisk oförstörande provning av skivprodukter är Frederiksen (1992) och Larsson (1994).

#### 3.5.2 Teoretisk grundval

Diskussionen förs i det följande för ett virkesstycke i form av en regel med tvärsnittsmåtten  $B \times H$  och längden  $L$ . Regeln antas inledningsvis ha konstant densitet  $\rho$  samt konstant elasticitetsmodul  $E$  parallellt regelns längdriktning. Om en sådan regel läggs upp med bestämda randvillkor uppvisar den ett antal resonansfrekvenser  $f_n$  som är strukturegenskaper. Till varje sådan resonansfrekvens hör en egenmod  $\Phi_n$  som tillika är en egenskap för den aktuella regeln. Egenmoderna  $\Phi_n$  kan hänföras till olika "familjer". De familjer av egenmoder som främst är aktuella här är sådana som motsvarar:

Axialsvängning  $\Phi_{A-n}$  (Axial)

Böjsvängning i styva leden  $\Phi_{BE-n}$  (Bending Edgewise)

Böjsvängning i veka leden  $\Phi_{BF-n}$  (Bending Flatwise)

Teoretisk beräkning resp etablering genom dynamisk provning av egenmoder ur olika sådana familjer redovisas av Ohlsson & Perstorper (1992).

#### Axialmoder

Resonansfrekvensen nr  $n$  inom axialsvängningsfamiljen  $f_{A-n}$  kan tecknas:

$$f_{A-n} = \gamma_{A-n} n (E/(\rho L^2))^{0.5} \text{ (Hz)} \quad (1)$$

där konstanten  $\gamma_{A-n}$  beror av upplagsförhållandena. Vid kända upplagsförhållanden är det alltså möjligt att lösa ut elasticitetsmodulen  $E$  som funktion av resonansfrekvensen  $f_{A-n}$ , vilken kan mätas med stor noggrannhet genom dynamisk provning. Elasticitetsmodulen kan då tecknas:

$$E = \rho L^2 (f_{A-n})^2 / (\gamma_{A-n})^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (2)$$

Vid val av fria randvillkor (regeln svävar fritt) och mätning av resonansfrekvensen  $f_{A-1}$  i första axialmoden förenklas uttrycket (2) till:

$$E = 4\rho L^2 (f_{A-1})^2 \quad (3)$$

Från detta uttryck erhålls alltså ett värde på den "dynamiska" elasticitetsmodulen. Detta värde är normalt ett mycket bra närmevärde till det sanna värdet om man betraktar trä som ett viskoelastiskt material. Korrelationen mellan statisk och dynamisk elasticitetsmodul är vanligen mycket stark för virkesstycken med inhomogeniteter såsom kvistar. Det "dynamiska" värdet brukar vara ca 5-10% högre än motsvarande värde etablerat genom statisk provning, jfr Perstorper (1994a). Skillnaden kan tillskrivas det faktum att även vid standardiserad statisk korttidsprovning hinner vissa krypdeformationer att uppkomma som är hänförliga till den viskösa delen av materialegenskaperna enligt en viskoelastisk materialmodell.

Den genom dynamisk provning och utnyttjande av ekvation (3) etablerade  $E$ -modulen kan betraktas som ett slags vägt medelvärde av  $E$ -modulen längs längden  $L$  hos en verklig regel med geometriskt varierande materialegenskaper. Denna  $E$ -modul har visat god korrelation till böjhållfastheten vid provning av en större serie virkesstycken. Genom denna korrelation kan den dynamiskt bestämda elasticitetsmodulen användas som sorteringsparameter för hållfasthetssortering av virke. Känsligheten för imperfektioner har bl a studerats teoretiskt av Larsson (1995).

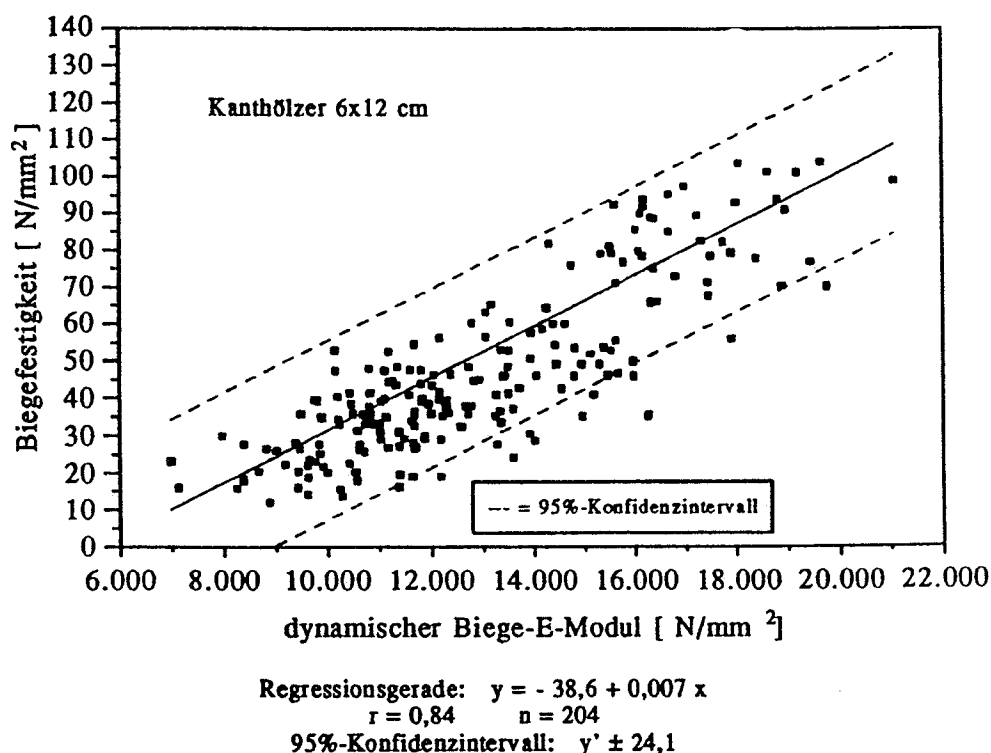
### Böjmoder

På motsvarande sätt som för axialmoder kan den dynamiska elasticitetsmodulen etableras via mätning av resonansfrekvenser hörande till någon av böjsvängningsfrekvenserna. Utifrån de ursprungliga antagandena om homogena materialegenskaper ska sådan etablering ge samma värde som erhöles via axialmoden. För egenmod nr 1 av typen böjning på lågkant erhålls för fria randvillkor följande samband:

$$E_{BF-1} \approx 0,95\rho L^4 (f_{BF-1})^2 / B^2 \quad (4)$$

Begränsningarna för detta samband är de som begränsar dynamisk enkel balkteori enligt Euler/Bernulli. Beträffande grundmoden vid böjsvängning på lågkant utgör detta normalt inget problem. Vid moder med högre modnummer och vid moder representerande böjning på högkant kan dock skjuvdeformationer och rotationströghet inverka så att en mer avancerad balkteori enligt Timoshenko behöver användas, se vidare Perstorper (1994a). Korrelationen mellan denna typ av dynamiskt bestämd elasticitetsmodul och böjhållfasthet på högkant har visat sig vara god, jfr Perstorper (1994b). Ett sådant samband mellan dynamiskt etablerad

elasticitetsmodul från svängningsförsök med böjsvängning på lågkant och hållfasthet vid böjprovning på högkant återges i figur 3.5.1.



Figur 3.5.1 Samband mellan dynamiskt etablerad elasticitetsmodul och böjhållfasthet. Efter Sauter (1992).

### Jämförelse mellan metodik baserad på axial- resp böjmoder

Vid en jämförelse mellan ekvation (3) och ekv (4) finner man att enligt båda metoderna (via axialmoder alternativt böjmoder) behövs information om längd och densitet hos regeln. Vid metod som utnyttjar böjsvängning på lågkant behöver man även information om tvärsnittsmåttet B. Vid metodik som utnyttjar böjsvängning på högkant behövs ofta ytterligare information om skjuvmodul och tvärsnittsegenskaper vid skjuvning.

Vidare observeras att längden ingår med fjärde potensen i ekvation (4), medan den bara ingår med andra potensen i ekvation (3). Ur noggrannhetssynpunkt innebär detta att metodik baserad på böjmoder kräver relativt noggrann längdmätning. Sammantaget innebär detta att metoden via mätning av resonansfrekvenser associerade med axialsvängning är den mest robusta ur ett teoretiskt perspektiv. Elasticitetsmodulen från böjsvängning på högkant är dock den parameter som vanligtvis är bäst korrelerad med böjhållfasthet och böjstyvhet. Detta är naturligt eftersom den statiska provningen sker på högkant.

### 3.5.3 Provningsteknik

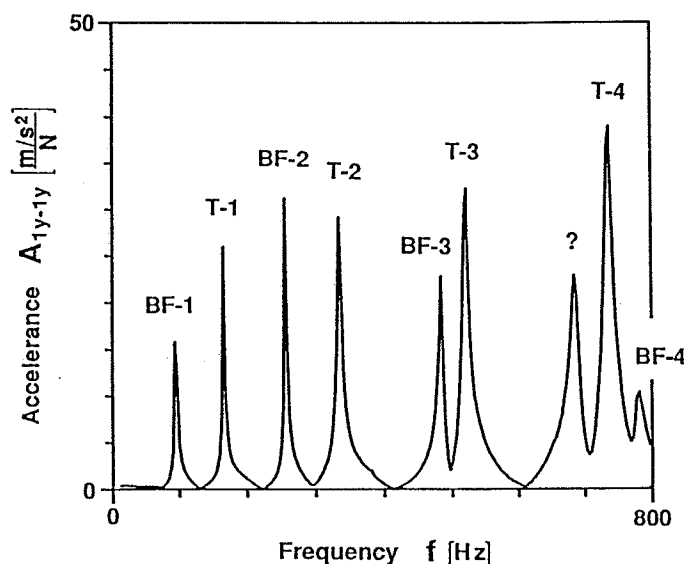
Den dynamiska provningen kan utföras som påtvingna svängningsförsök med bredbandig dynamisk last. De olika tekniker som står till buds beskrivs av Ewins (1984). Den vanligaste

tekniken som används i laboratorium utgörs av stötförsök, där dynamisk kraft i form av en impuls påförs med en hammare med påmonterad kraftgivare. Kraftgivaren förses med en elastisk anslagsyta av lämpligt material för att ge en tidslängd hos kraftpulsens som leder till att motsvarande Fourierspektrum täcker in det frekvensområde som rymmer den eller de resonansfrekvenser som ska identifieras. Responsen mäts oftast med piezoelektriska accelerometrar, som kan fästas till virkesdelen med vax, se vidare Ohlsson & Perstorper (1992). Responsen kan också mätas med mikrofon varvid det utstrålade ljudtrycket som alstras av vibrationerna registreras.

Fouriertransformering av parallellt uppmätta kraft- respektive accelerationsfunktioner medger etablering av komplexa överföringsfunktioner. Kraftpulsens och responsens variation i tiden transformeras därvid om till frekvensplanet, se figur 3.5.2. Beloppet av en sådan överföringsfunktion visas i figur 3.5.3. Denna typ har dimension  $(\text{m/s}^2)/\text{N}$  och benämns accelerans.



Figur 3.5.2. Exempel på tidsvarierande signal och korresponderande frekvensspektrum efter Fouriertransformering.

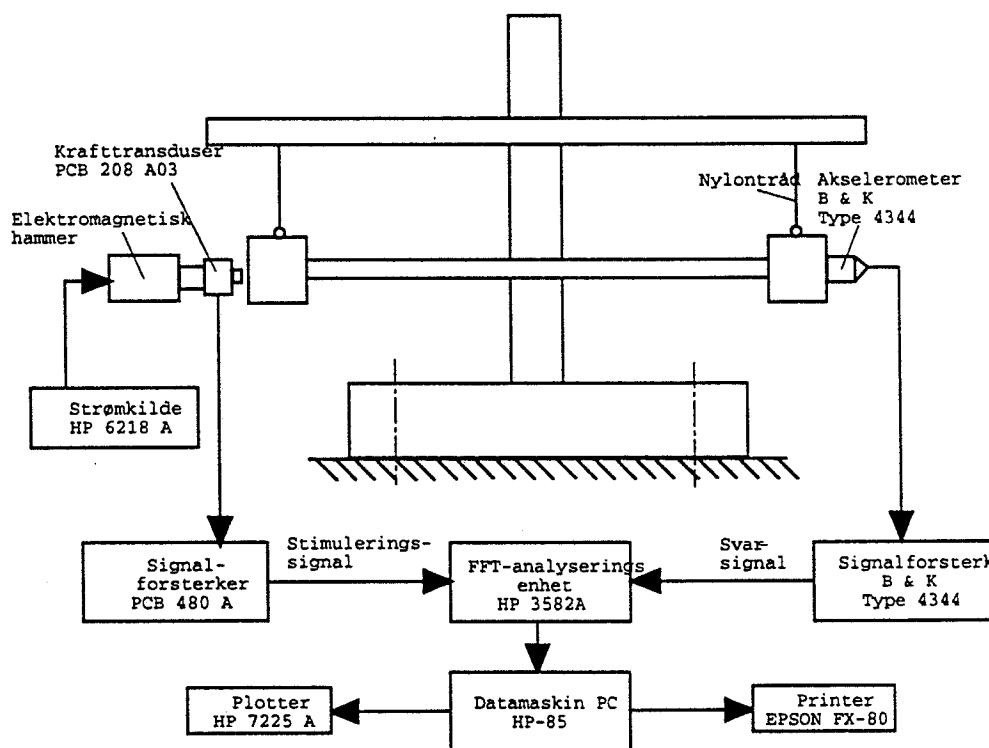


Figur 3.5.3. Belopp av accelerans  $A_{i-j}(f)$  etablerad från dynamisk provning av virkesdel.

Ur en sådan accelerans kan resonansfrekvenserna för olika egenmoder identifieras genom kurvanpassning. Vid industriell tillämpning där många parametrar endast varierar inom relativt snäva gränser kan bestämning av resonansfrekvenser sannolikt göras med förenklad teknik. Identifieringen av resonansfrekvenser skulle därvid kunna utföras på basis av enbart responsspektrum utan etablering av överföringsfunktioner. Den aktuella metodiken visar

mycket bra resultat under laboratorieförhållanden, se t ex Perstorper (1994a). Den synes även ha en god potential som grund för industriell tillämpning i sågverk. Stötexcitering torde inte vara särskilt svår att anpassa till en industriell miljö. Responsmätningen torde dock behöva göras med beröringsfri mätmetodik. Ett sätt att göra detta är att ersätta accelerometrarna med laserbaserade hastighetsgivare.

I figur 3.5.4 ges exempel på provutrustning för modanalys av axialsvängande stänger där stötexciteringen åstadkoms med en elektromagnetisk hammare. Observera att FFT-enheten idag kan ersättas med en persondator (PC) med inbyggt kort för analog/digital-omvandling samt programvara för FFT.



Figur 3.5.4 Exempel på system för modanalys av axialsvängande stänger (Gibson 1985).

### 3.5.4 Fördelar och nackdelar

Det finns idag ingen automatiserad process för industriellt bruk tillgänglig. All provning har hittills skett i laboratoriemiljö med manuell hantering av varje virkesenhet vilket innebär att systemet ännu är för långsamt. En annan nackdel är att metodiken levererar ett viktat medelvärde på elasticitetsmodulen för varje virkesenhet. Fördelen med metoden är främst att den i laboratoriemiljö visat sig kunna prediktera böjhållfasthet och statisk elasticitetsmodul med lika stor eller större precision än dagens böjande maskiner [Perstorper 1994b; Sauter 1992; Tanaka m fl 1994].

### 3.5.5 Referenser

- Cooley, J & Tukey, J 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Maths. of Comput. 19 (90), pp 297-301.
- Enochson, L. 1985. Examples of structural modal analysis. Proceedings of 5th International NDT of Wood Symp. :407-421, Washington State Univ., Pullman, Washington, USA.
- Ewins, D 1984. Modal testing. Theory and practice. Research Studies Press, Somerset, U K, 268 pages.
- Frederiksen, P. 1992. Identification of material parameters in anisotropic plates - A combined numerical / experimental method. Doctoral thesis, The Danish Center for Applied Mathematics and Mechanics, The Technical University of Denmark, Lyngby, 109 pages.
- Gibson, R.F. 1985. Frequency domain testing of materials. Proceedings of 5th Intern'l NDT of Wood Symp.:385-406. Washington State Univ., Pullman, Washington, USA.
- Goens, E 1931. Determination of Young's modulus from flexural vibrations (in German). Annalen der Physik, 11(6), pp 649-678.
- Kollmann, F & Krech, H 1960. Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. Holz als Roh- und Werkstoff, Heft 2, pp 41-54.
- Larsson, D. 1994. Dynamic evaluation of orthotropic material constants. Thesis for the degree of Licentiate in Engineering, Dynamics in Design, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Larsson, D. 1995. Accuracy of dynamically estimated elastic wood constants. Proc of the 13th International Modal Analysis Conference, Nashville, pp 1444-1450. Published by Soc of Exp Mechanics, Bethel.
- Ohlsson, S & Perstorper, M. 1992. Elastic wood properties from dynamic tests and computer modelling. Journal of Structural Engineering, Vol 118, No 10, pp 2677-2690.
- Perstorper, M. 1994a. Dynamic modal tests of timber - Evaluation according to Euler and Timoshenko theory. Proc of the 9th Int Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Madison, Wi. 1993, pp 45-53. Published by Washington State Univ 1994.
- Perstorper, M. 1994b. Strength and stiffness prediction of timber using conventional and dynamic methods. Proc of the First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood, pp 321-330. Univ of Sopron, Hungary.

- Sauter, U 1992. Technologische Holzeigenschaften der Douglasie als Ausprägung unterschiedlicher Wachstumsbedingungen. Doctoral dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, 221 pages.
- Tanaka, T.; Nagao, H.; Nakai, T. 1991. Nondestructive evaluation of bending and tensile strength by longitudinal and transverse vibration of lumber. Proc. 8th Int. Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Vancouver WA. page 57-72.

### 3.6 Vågutbredningshastighet från ultraljudprovning som sorteringsparameter

#### 3.6.1 Inledning

Vågutbredning i elastiska medier har under lång tid använts för olika materialtekniska tillämpningar. Exempelvis utnyttjas mekanisk vågutbredning inom geofysiken, bl a för petroleumprospektering. Utbredningshastigheten hos mekaniska vågrörelser lyder olika lagar för olika vågtyper, men generellt sett beror sådana hastigheter på förhållanden mellan något karakteristiskt styvhetsmått och masströgheten hos mediet. Detta innebär att för material som uppvisar en korrelation mellan hållfasthet å ena sidan och relation mellan styvhet och massa å den andra, kan en vågutbredningshastighet användas som indikator på hållfasthet. Detta tillämpas t ex på lerjordlager, där uppmätt skjuvvåghastighet används som indikator på skjuvhållfasthet.

Inom träområdet används uppmätt kompressionsvåghastighet för uppskattning av hållfasthet hos virke. Normalt anbringas en transient töjningspuls av kort varaktighet, säg 10 mikrosekunder. Tiden det tar för denna puls att färdas en viss sträcka utmed virkesstycket mäts och motsvarande hastighet beräknas. Den relateras sedan till förväntad hållfasthet via erfarenhetsmässigt etablerade statistiska samband. Kompressionsvågornas frekvens är normalt betydligt högre än vad som kan uppfattas av det mänskliga örat (50 kHz - 1 MHz) , därav benämningen ultraljudprovning.

Ultraljudprovning har även inom träområdet använts på traditionellt sätt för att detektera svaghetszoner. Kimura et al (1991) utgör ett sådant exempel, där tekniken används för att detektera bristande limfogskontakt i limträ. Vid denna tillämpning används kompressionsvågor med frekvens uppemot 250 kHz. De tidigaste tillämpningarna rörde dock detektering av röta i kraftledningsstolpar och virkesfel i träd på rot samt bestämning av träets elastiska egenskaper i olika riktningar [Han & Birkeland 1992].

#### 3.6.2 Teoretisk grundval

Vågrörelse i elastiska homogena oändliga media sker genom två vågtyper, vilka brukar benämnas kompressionsvågor och skjuvvågor. Kompressionsvågor karaktäriseras av att partikelrörelsen sker i samma riktning som vågutbredningsriktningen. Kompressionsvågor kallas därför ibland synonymt för longitudinalvågor. Skjuvvågor däremot karaktäriseras av att partikelrörelsen sker vinkelrätt mot utbredningsriktningen. Dessa kallas således synonymt för transversalvågor.

I ändliga kroppar uppträder även andra vågtyper. Nära begränsningsytan hos ett halvoändligt medium uppträder t ex sk Rayleighvågor. I balk- och plattliknande kroppar uppträder även böjvågor. De senare har mycket speciella egenskaper, bl a är deras utbredningshastighet frekvensberoende.

Vågutbredningshastigheten för kompressionsvågrörelse  $v_c$  i ett elastiskt homogent isotropt oändligt medium kan tecknas:

$$v_c = (D/\rho)^{0,5} \text{ (m/s)} \quad (1)$$

där  $\rho$  representerar densitet och  $D$  är en enaxlig materialstyvhet vid förhindrad tvärkontraktion. Relationen mellan  $D$  och elasticitetsmodulen  $E$  och Poissons tal  $\nu$  kan tecknas:

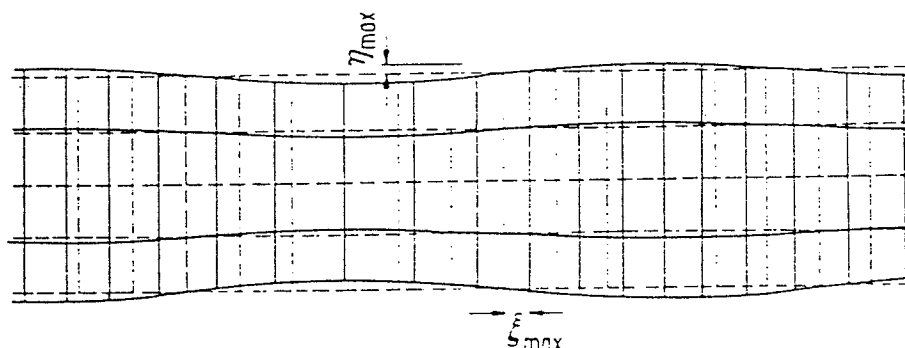
$$D = E(1-\nu)/((1+\nu)(1-2\nu)) \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (2)$$

Vid ett isotropt material med Poissons tal (tvärkontraktionstalet)  $\nu=0,3$  blir alltså  $D$  ca 35% högre än den vanligtvis använda parametern  $E$ .

Utbredning av en kompressionsvåg kan även ske i en oändlig stav av elastiskt material med små tvärsnittsmått. Enligt Clough & Penzien (1975) beror utbredningshastigheten då istället av  $E$  enligt ekv (3):

$$v_{c,rod} = (E/\rho)^{0,5} \text{ (m/s)} \quad (3)$$

Denna lägre utbredningshastighet är då relaterad till fallet med fri tvärkontraktion som illustreras av fig 3.6.1.



Figur 3.6.1 Illustration av kompressionsvågutbredning i elastisk stav.

Vågutbredningshastigheterna uttryckta via ekvation (1) resp ekv (3) är alltså enbart beroende av materialbeskrivande elastiska parametrar och densitet. Detta innebär bl a att dessa hastigheter är oberoende av frekvensen hos töjningsvariationen i en punkt. Teoretiskt innebär detta att en transient töjningspuls som anbringas på ett tvärsnitt av en stav kommer att transporteras längs staven utan att pulsens tidsfunktion distorderas. Detta förhållande är en förutsättning för att man ska kunna mäta utbredningstiden för en kortvarig puls mellan två tvärsnitt av staven med god noggrannhet.

Utbredningshastigheten  $v_{c,rod}$  är av storleksordningen 5000 m/s för skandinaviskt barrvirke. Detta innebär att de gångtider som ska mätas är av storleksordningen 0,001 s. Den töjningspuls ("stresswave") som läggs på bör då ha en varaktighet som är kort i förhållande

till denna typiska gångtid. Pulsens varaktighet blir således av storleksordningen mikrosekunder.

En impuls kan dock frekvenstransformeras via Fouriertransform och det kan visas att beloppet för Fourierspektrum av en impuls grovt kan beskrivas som plant upp till en övre gränsfrekvens, över vilken inga väsentliga bidrag återfinns. En impuls kan därför uppfattas som en summa av ungefär lika stora harmoniska komponenter med frekvenser mellan 0 Hz och  $f_{\max}$ . Grovt sett kan  $f_{\max}$  beräknas som inverterade värdet av pulsens längd  $t_p$ . Vid en längd hos töjningspulsen om  $t_p = 0,00001$  s kommer alltså pulsens frekvensspektrum att täcka området mellan 0 och 100 kHz.

Det är av intresse att diskutera våglängderna hos övre extremvärdet inom detta frekvensområde. En vågutbredningshastighet om 5 km/s och en frekvens om 100 kHz resulterar i en våglängd om 50 mm. Denna korta våglängd indikerar dock problem med att uppfylla de tidigare antagandena om en ideal stav med små tvärsnittsmått i förhållande till våglängden. För en vanlig virkesdimension, t ex 45 x 195 mm, måste våglängden vara åtminstone av storleksordningen meter för att den ska anses vara 'stor' i förhållande till 195 mm. Vid frekvenser under ca 1 kHz uppfylls detta förhållande. Exemplet leder då till följande slutsats: De Fourierkomponenter som representerar pulsen kan delas in i en lågfrekvent del ( $<1000$  Hz) som någorlunda väl kommer att lyda ekvation (3) och en högfrekvent del ( $>10000$  Hz) som kommer att väsentligen uppfatta virkesdelen som ett kontinuum och följa ekvation (1) med åtföljande högre utbredningshastighet. Däremellan finns ett frekvensband som representerar en blandning. Detta innebär ett avsteg från vad som sagts tidigare genom att en blandning av så vitt skilda frekvenskomponenter kommer att medföra att pulsens tidsfunktion kommer att distorderas något under det att den färdas längs virkesbiten.

Trä är som bekant ett höggradigt anisotropt material. Detta innebär i det aktuella fallet två viktiga modifikationer av tidigare diskussion:

- Vid perfekt sammanfallande fiberriktning och längdriktning hos virkesdel är materialstyvheten  $D$  bara någon enstaka procent högre än elasticitetsmodulen  $E$ , vilket drastiskt minskar problemen med olika vågutbredningshastigheter vid olika våglängder.
- Vid snedfibrighet (lokalt eller globalt i relation till virkesdelens längdriktning) kommer vågutbredningshastigheten att bli svårförutsägbar med hänsyn till de tämligen komplicerade samband som gäller vid anisotropa material.

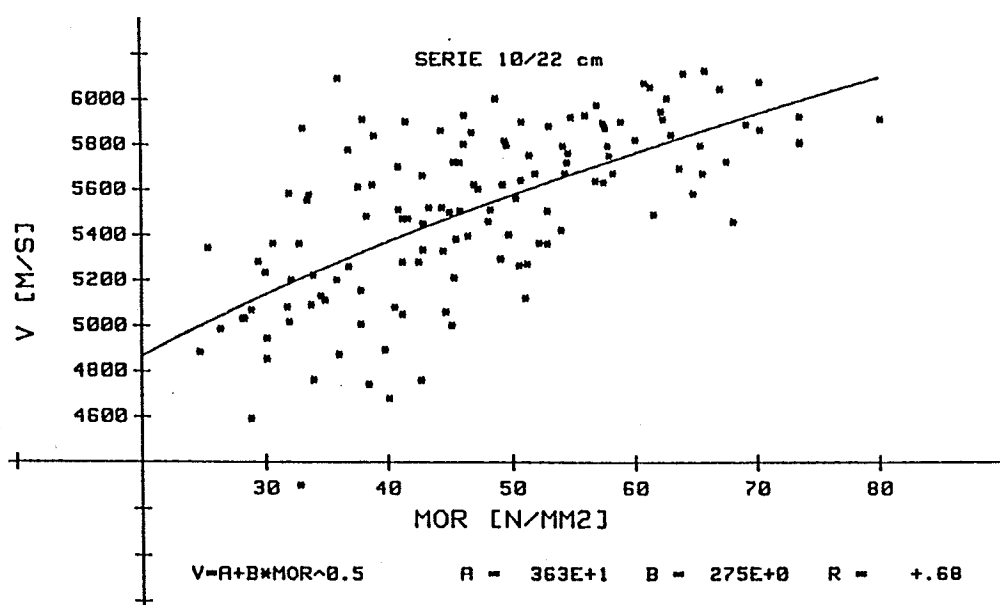
Bucur & Archer (1984) diskuterar vågutbredning i trä betraktat som ett anisotropt material. Vågutbredningshastigheten är olika i träets tre huvudriktningar främst på grund av de stora skillnaderna i elasticitetsmodul.

Det har visats att det föreligger ett statistiskt samband mellan uppmätt vågutbredningshastighet längs en virkesdel och dess hållfasthet, jfr t ex Sandoz (1989). Figur 3.6.2 illustrerar ett sådant samband för 4,4 m långt granvirke. Denna typ av samband utgör grunden för vågutbredningshastigheten som potentiell sorteringsparameter för

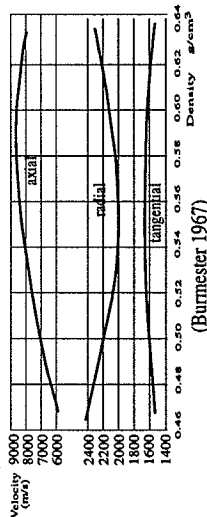
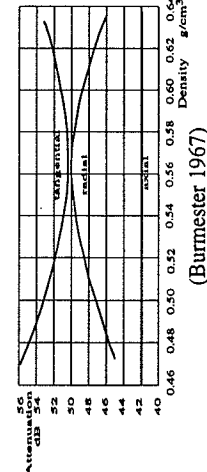
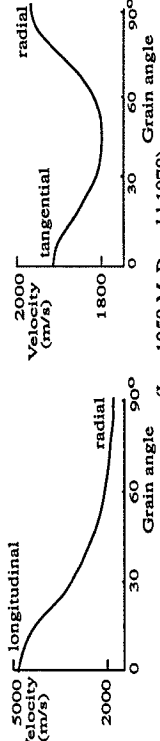
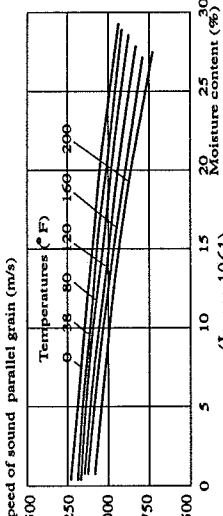
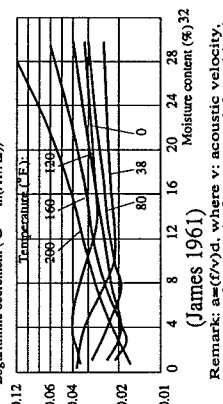
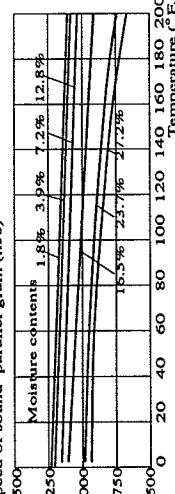
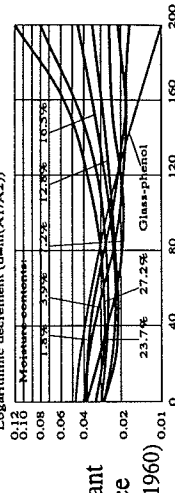
konstruktionsvirke. I Schweiz har man etablerat ett system för sortering av konstruktionsvirke på basis av vågutbredningshastighet uppmätt med instrumentet Sylvatest.

Förutom vågutbredningshastigheten har även dämpningen visat sig kunna relateras till träets mekaniska egenskaper. Dämpningskoefficienten kan definieras som reduktionen av amplitud- eller energinivå hos ljudpulsen när den tillräggalagt en viss sträcka genom mediet. I figur 3.6.3 anges hur strukturegenskaper, fuktkvot och temperatur påverkar vågutbredningshastigheten och dämpningen.

I figur 3.6.4 anges en rad tillämpningar av ultraljudsteknik på träomtrådet samt korresponderande modeller.



Figur 3.6.2 Samband mellan vågutbredningshastighet och hållfasthet (Modulus of Rupture) för granvirke. Obs bruten y-skala. Efter Sandoz (1989)

|                          | Velocity                                                                                                                                                                                  | Attenuation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wood density             |  <p>(Burmester 1967)</p>                                                                               |  <p>(Burmester 1967)</p>                                                                                                                                                                                                                                     |
| Grain angle              |  <p>(Lee 1958 McDonald 1978)</p>                                                                        | <p>Grain angle increment <math>\Rightarrow</math> Attenuation increment<br/>(Han 1989)</p>                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Structural orthogonality | <p><math>V(\text{along grain}) &gt; V(\text{radial}) &gt; V(\text{tangential})</math><br/>(Burmester 1967, McDonald 1978)</p>                                                             | <p>Atten.coef.(along grain) &gt; Atten.coef.(cross grain)<br/>(Lakatos 1960, Burmester 1967, McDonald 1978, Okyere &amp; Cusin 1980, Syrsiad 1986)</p>                                                                                                                                                                                        |
| Moisture content         | <p>No significant influence<br/>(Miller et al. 1965, McCrack &amp; Vann 1983)</p>  <p>(James 1961)</p> | <p>M.C. increment <math>\Rightarrow</math> Attenuation decrement<br/>(Hearmon 1965)</p>  <p>(James 1961)</p> <p>Remark: <math>a = (f/v)d</math>, where v: acoustic velocity, f: acoustic frequency, d: logarithmic decrement, usually independent of f.</p> |
| Temperature              |  <p>(James 1961)</p>                                                                                  | <p>No significant influence<br/>(Lakatos 1960)</p>  <p>(James 1961)</p>                                                                                                                                                                                    |

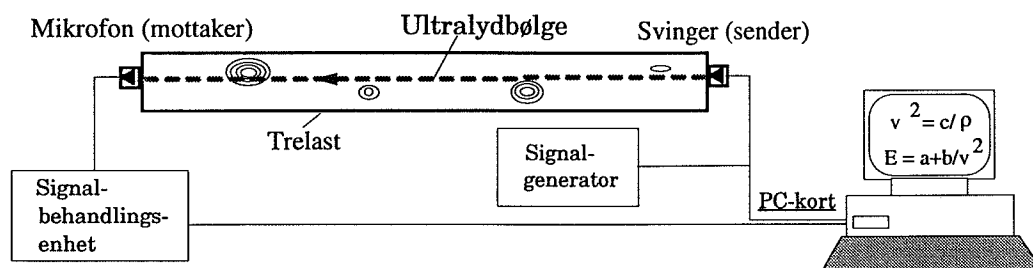
Figur 3.6.3 Inverkan av olika faktorer på vågutbredningshastighet och dämpning [Han1991].

| Test task                                                    | Sensing arrangement                                                                    | Specimen                                                                    | Wave feature                           | Model or relation used in investigation                                                                                                                                                                                                                                                              | Remarks about the model/relation                                                                   | Literature                  |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Attenuation coefficient                                      | Through-transmission, across / parallel to grain                                       | Solid wood of:<br>White spruce<br>Red pine<br>Ameri. beech<br>Red oak       | 1 MHz<br>500 kHz<br>250 kHz            | $a_1 = a_0 + (20/(L_2 - L_1)) \log(A_1/A_2)$<br>where $a_0$ : the attenuation coefficient of water,<br>$L_1$ and $L_2$ : thicknesses of two samples of<br>a wood species, $A_1$ and $A_2$ : amplitudes of<br>sound after passing through $L_1$ and $L_2$ .                                           |                                                                                                    | Okyere & Cousin<br>1980     |
| Elastic stiffness                                            | Through-transmission<br>in all the three<br>principal directions                       | Solid wood<br>of:<br>Spruce<br>Pinus<br>Douglas<br>Tulipree<br>Oak<br>Beech | 1MHz                                   | Christoffel solution:<br>$ G_{ik} - r v^2 d_{ik}  p = 0$<br>where $G_{ik}$ : Christoffel stiffnesses, $r$ : wood density,<br>$v$ : phase velocity, $d_{ik}$ : Kröner's delta,<br>$p$ : components of displacement vector.                                                                            | $p_k$ is non-zero.                                                                                 | Bucur 1985                  |
| Modulus of elasticity for evaluation of quality of seasoning | Logitudinal through-transmission                                                       | Plank of:<br>Scot pine<br>Norw. spruce                                      | Hammer striking                        | $E = v^2 r$ where $E$ : Dynamic Young's modulus,<br>$v$ : speed of sound along plank,<br>$r$ : wood density.                                                                                                                                                                                         | Poisson's ratio is considered to be zero                                                           | Newman 1987                 |
| MOE and MOR for lumber grading                               | Logitudinal through-transmission                                                       | Spruce beams                                                                | 50 kHz                                 | $v^2 = A + B / \text{MOE}$ (1)<br>$v = a + b \text{ MOR}^{0.5}$ (2)<br>where $v$ : acoustic velocity in longitudinal direction of the wood beam, MOE: modulus of elasticity, MOR:<br>modulus of rupture, $A, B, a, b$ : constants.                                                                   | Correlation coefficient:<br>for (1): $r > 0.8$<br>for (2): $r > 0.6$ .                             | Sandoz 1989                 |
| Axial compression crushing strength with decayed core bore   | Radial through-transmission                                                            | Cedar poles                                                                 | 20 kHz                                 | $d = D(1 - t/t_0)$ where $d$ : Diameter of the decay core bore,<br>$D$ : Pole diameter, $t$ : transit time thro.<br>a decayed cross section, $t_0$ : transit<br>time thro. a decay-free section,<br>$P = 1 - (d/D)^2$<br>$P$ : relative compression strength of<br>$s$ a pole or log with core bore. | Ratio of radial velocity<br>in soundwood<br>over transversal velocity<br>in decay area is 1.27.    | Breeze &<br>Nilberg<br>1971 |
| Pole soundness                                               | Radial through-transmission                                                            | Cedar poles                                                                 | Hammer striking                        | Soundness taken as a function of difference of transit times<br>( $t-t_0$ ), where $t$ : transit time thro. a decay-free cross-<br>section, and $t_0$ : transit time thro. a decayed cross-section.                                                                                                  | Ratio of radial velocity<br>in soundwood<br>over transversal velocity<br>in decay area is 1.1-1.4. | Miller et al.<br>1965       |
| Detection of early decay                                     | Through-transmission cross grain                                                       | Wafers and<br>timber of:<br>White fir<br>Douglas fir                        | 35 kHz<br>54 kHz<br>150 kHz<br>500 kHz | $v = -ax + b$<br>where $v$ : velocity of sound through wood attacked<br>by early decay, $x$ : weight loss caused by decay,<br>$a, b$ : positive constants                                                                                                                                            | Correlation coefficient<br>for white fir<br>$0.67 - r - 0.91$ .                                    | Wilcox 1988                 |
| Artificial holes                                             | Through-transmission cross grain                                                       | Solid wood<br>of oak                                                        | 500 kHz                                | Holes cause reduction in transmission of<br>ultrasonic energy wrt that through sound wood.                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                    | Waid &<br>Woodman<br>1957   |
| Artificial holes                                             | Through-transmission cross grain                                                       | SUGI<br>(Cryptomeria<br>japonica)<br>BUNA<br>(Fagus crenata)                | 20 kHz<br>50 kHz<br>100 kHz            | $v = -ax + b$<br>where $v$ : velocity of sound through bored wood,<br>$x$ : breadth of a hole (cave) perpendicular<br>to the direction of propagation of wave,<br>$a, b$ : positive constants                                                                                                        | A single large<br>hole or a number<br>of small holes                                               | Sumiya 1965                 |
| Detection of holes (made by European bejatus)                | Through-transmission, radial/tangential                                                | Scots pine                                                                  | 45 kHz                                 | $y = a + b / (1 + c x)$<br>where $y$ : hole percentage, $x$ : time increment wrt the time<br>through sound wood, $a, b$ and $c$ : positive constants                                                                                                                                                 | Square of correlation<br>coefficient<br>$r^2 - 0.58$                                               | Prieto 1989                 |
| Detection of knots                                           | Through-transmission long principal axis of knots<br>Through-transmission across knots | Lumber                                                                      | 100 kHz                                | Amplitude increment and velocity increment<br>wrt the situations through sound wood<br><br>Amplitude reduction and velocity reduction<br>wrt the situations through sound wood                                                                                                                       | True for both<br>green and dry                                                                     | Burmester<br>1967           |

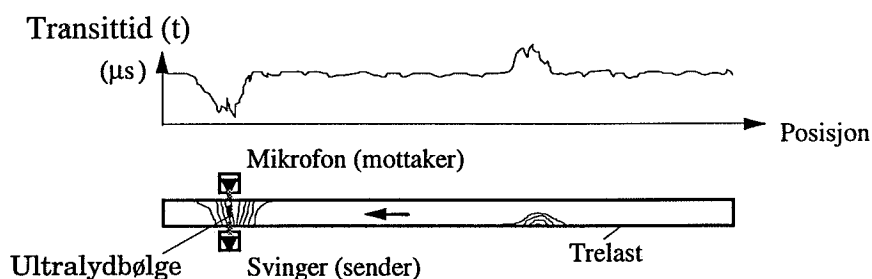
Figur 3.6.4. Tillämpning av ultraljudteknik på träområdet [Han1991].

### 3.6.3 Provningsmetodik

Ultraljud används mestadels för provning längs virkesstycken, se figur 3.6.5.a, men tekniken tillämpas även vinkelrätt mot fiberriktningen främst för att detektera svaghetszoner, se figur 3.6.5.b.



a. Längsvejs ultralydtransmisjon



b. Tvärs ultralydtransmisjon

Figur 3.6.5 Ultraljudprovning längs och tvärs virkesstycken.

#### Provning i virkets längsriktning

Nuvarande utrustning för provning består av handhållna apparater. Provning bör ske under fria randvillkor, vilket normalt efterliknas genom uppläggning av virkesbiten på mjukt underlag. Utrustningen består typiskt av tre delar. Den första delen genererar en töjningspuls, den andra delen mäter den resulterande rörelsen som orsakas av att töjningspulsen passerar. Endera används två separata rörelsegivare eller är den första rörelsegivaren integrerad i delen som genererar kraft. Den tredje komponenten innehåller beräkningskapacitet samt utrustning för tidsmätning, triggerfunktioner m.m. (figur 3.6.5.a). Såväl exciteringsdonet som rörelsedetektorn kan anbringas mot virkesstycket genom handkraft. För att kunna överföra de högre frekvenskomponenterna hos pulsen till virket kan ett skikt av vax eller liknande behöva anbringas. Den låga kontaktstyvheten fungerar annars som en elastisk isolator och försvårar införandet av de högfrekventa kraftkomponenterna.

I de fall man vill undvika effekterna av den avvikelse från ideal oändlig stav som en ändlig virkesbit innebär mäts ibland mellan kortare sträckor närmre mitten på en regel eller plank. I dessa fall måste exciteringen ske från långsidan hos virket. Detta innebär givetvis att resultatet inte blir en ren kompressionsvåg, utan snarare en kombination av olika vågtyper. Detta

förfarande inför alltså ytterligare svårigheter vid utvärderingen. Motsvarande problem uppträder hos en kompressionsvåg som når en sektion av regeln som innehåller kvist eller liknande. Framförallt vågdelarna som representerar högre frekvenser och kortare våglängder kommer då att avlänkas och delvis övergå i vågtyper av andra slag med andra vågutbredningshastigheter. Detta 'scattering'-fenomen är välkänt inom andra användningsområden för ultraljudprovning, t ex tillämpningar där man söker detektera svaghetszoner i betong. Ravi-Chandar & Schneider (1994) använder t ex ultraljudvågteknik för att detektera plasticeringszoner vid botten på utmatningssprickor i stål. Analogier till omfattningen av kvist i virke skulle möjligen kunna utvecklas.

Sammantaget konstateras att inhomogeniteter såsom kvist och tjurved distorderar en plan kompressionsvåg med kort våglängd som färdas längs ett virkesstycke. Den direkta slutsatsen är att detta i hög grad försvårar distinkt mätning av vågutbredningshastighet vid vågor med hög frekvens (>10 kHz) och åtföljande kort våglängd. Å andra sidan kan denna typ av fenomen sannolikt användas för indikation av mängden inhomogeniteter och därmed ge väsentlig information. Att på så sätt vända ett problem till en fördel kräver dock viss kunskap som ej veterligt finns tillgänglig idag.

Liksom för samtliga potentiella tekniker för industrialiserad hållfasthetssortering av virke, torde beröringsfri mätteknik vara nödvändig för att uppnå en rationell process. Såvitt bekant finns idag inte någon etablerad robust teknik för sådan mätning inom det högre frekvensområdet (omkring 100 kHz). Möjligen pågår någon utveckling inom området aukustisk emission.

### Provning tvärs virket

Vid provning tvärs virket kan mikrofon användas för att fånga upp signalen, se figur 3.6.5.b. Vanligtvis skickas signalen i virkets tjockleksriktning. Genom att mäta i en rad punkter längs virket fås en indikation på virkesfelens variation i längsled. Vågutbredningshastighet och dämpning tvärs virke har visat sig ha samband med typ och förekomst av virkesfel (McDonald 1978). I tabell 1 ges en översikt över hur olika virkesfel inverkar på vågutbredningshastighet och dämpning.

*Tabell 1. Vågutbredningshastighet och dämpning i samband med olika virkesfel i förhållande till felfritt virke (Han 1991).*

| Virkesfel                       | Lydshastighet | Dämpningskoefficient |
|---------------------------------|---------------|----------------------|
| Kvist, parallell med lydstrålen | >             | ≤                    |
| Kvist, skrått med lydstrålen    | <             | >                    |
| Hull, skrått med lydstrålen     | <             | >                    |
| Sprekk, skrått med lydstrålen   | <             | >                    |
| Råte                            | <             | >                    |
| Harpikskanal                    | <             | >                    |
| Føyre                           | <             | >                    |

### 3.6.4 Fördelar och nackdelar

Den aktuella tekniken är i sin enklaste form behäftad med vissa svagheter i relation till grundläggande teori. Dessa är främst av två kategorier. Den första typen av problem är relaterad till användning av en kortvarig puls med brett frekvensspektrum och därmed följande brett spann av våglängder. Den andra typen av problem är relaterad till exciteringsmetoder och associerade lokala töjningsfält.

Om dessa problem kan bemästras torde metodiken kunna bli mycket lovande. Den första klassen av problem kan bearbetas genom användning av olika typer av filtrering och efterföljande signalbehandling. Genom detta skulle man kunna minska problemet med "var någon stans på pulsen" man ska mäta gångtiden när pulsens form har distorderats. Ett alternativt sätt att lösa problemet är att använda harmoniska signaler istället för pulsteknik. Detta kräver i så fall mer avancerad teknik för mätning av utbredningshastigheten.

Nuvarande kommersiell utrustning är dessutom inte tillräcklig snabb och rationell för industriell sortering.

### 3.6.5 Referenser

Bucur, V & Archer, R 1984. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. Wood Science and Technology, 18:255-265.

Clough, R & Penzien, J: Dynamics of structures 1975. McGraw-Hill, New York.

Han, W. 1991. An intelligent ultrasonic system for log scanning. Dr.ing.-avhandling innlevert til Norges tekniske høyskole, Trondheim, Norge.

Han, W., R. Birkeland 1992. Ultrasonic log scanning. Industrial Metrology 2:253-281.

Kimura, M et al. 1991. Ultrasonic pulse test on glulam glued connection. Proc of The 1991 Int Timber Engineering Conference, London, pp 2.250-2.257. TRADA, U K.

McDonald, K.A. 1978. Lumber defect detection by ultrasound. Research Paper FPL 311, Forest Products Laboratory, Forest Service, USDA, Madison, WIS., USA.

Ravi-Chandar, K & Schneider, E. 1994. Ultrasonic detection and sizing of plastic zones surrounding fatigue cracks. Research in Nondestructive Evaluation, Vol 5, No 3, pp 191-209.

Sandoz, J. 1989. Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology, Vol 23, pp 95-108.

## **3.7 Gjennomlysningsteknikker**

### **3.7.1 Generelt**

For å bestemme trevirkets styrke- og fasthetsegenskaper er det nødvendig å kjenne materialets iboende egenskaper. Ved tradisjonell visuell styrkesortering bedømmes feil og egenskaper som er synlige på trevirkets overflate. Kvisttype og -størrelse kombinert med margens plassering gir et brukbart bilde på hvordan et tverrsnitt ser ut innenfra. Likeledes vil årringbredden i endene kunne fortelle mye om virkets densitet. Ofte ville det imidlertid være ønskelig å vite mer eksakt hvordan materialene virkelig ser ut "inni". Med moderne gjennomlysningsteknikker er dette blitt en mulig realitet.

Innen helsevesnet har røntgen i mange år vært benyttet til å påvise indre skader og sykdommer. Røntgen kan brukes til å påvise kreftsvulster, benbrudd, hull i tennene osv. På samme måte kan forskjellige "gjennomlysningsteknikker" brukes til å påvise skjulte feil og indre egenskaper hos trevirke. Slik "gjennomlysningsteknikk" bygger vanligvis på bruk av forskjellige typer elektromagnetisk stråling.

### **3.7.2 Elektromagnetisk stråling.**

Elektromagnetisk stråling er energi som overføres gjennom det tomme rom eller gjennom et materielt medium i form av elektromagnetiske bølger. Disse bølgene spenner over et tilnærmet ubegrenset frekvensområde. Elektromagnetisk stråling deles vanligvis opp i forskjellige typer, avhengig av frekvens eller bølgelengde. Synlig lys, radiobølger, ultrafiolett og infrarød stråling er eksempel på elektromagnetiske bølger. De mest aktuelle typer for sortering av trevirke, er imidlertid mikrobølger, røntgen- og gammastråling.

### **3.7.3 Mikrobølger**

#### **3.7.3.1 Innledning**

Mikrobølger er elektromagnetiske bølger med frekvenser i området 300 MHz til 300 GHz, med aktuelle bølgelengder i området 1 til 100 mm. Bølgelengden og amplituden på bølgene avhenger av materialet de trenger igjennom. Bruk av mikrobølger er rapportert tilbake i 1950 årene hvor metoden ble anvendt til fuktighetskontroll av dielektriske materialer. Studier av mikrobølger i forbindelse med trevirke er bl.a. vist i [3], [4] og [5].

#### **3.7.3.2 Teoretisk grunnlag**

For praktiske formål, blir mikrobølger å betrakte som transmitterte retningsbestemte bølger. Det er tre målbare parametre for elektromagnetiske bølger, amplitude, fase og polarisasjon. Disse parametrene påvirkes av måleobjektets elektriske karakteristika. De aktuelle elektriske karakteristika er materialets dielektrisitetskonstant ( $\epsilon$ ) og materialets elektriske konduktans ( $\gamma$ ).  $\epsilon$  og  $\gamma$  påvirkes av materialets densitet og vanninnhold. Variasjoner av disse kan måles som en faseforskyvning. Mikrobølger vil miste intensitet på grunn av absorpsjon av, og spredning av energi. Amplituden påvirkes av måleobjektets bredde, densitet og vanninnhold. Temperatur og frekvensvalg har også betydning.

Forutsettes det at mikrobølgen beveger seg enten parallelt eller normalt på fiberretningen, er amplitude og fase gitt ved:

$$A = A_0 \cdot e^{(-\alpha \cdot z)}$$

$$\Phi = \Phi_0 - \beta \cdot z$$

hvor

$z$  = inntrengningsdybde

$A$  = amplitude

$\Phi$  = fase

$A_0, \Phi_0$  = tilsvarende størrelser på overflaten

$\alpha, \beta$  = konstanter avhengig av vanninnhold, densitet, frekvens og treslag

### 3.7.3.3 Måling av densitet og fuktighet

Ved kjent dimensjon og treslag er det mulig å beregne densitet og fuktighet som funksjon av demping og faseforskyvning av mikrobølgen, som vist i [3].

### 3.7.3.4 Måling av fiberhelling

Trevirke er et anisotropt materiale med forskjellige egenskaper i og tvers på fiberretningen. Dette gjelder også de elektriske egenskapene (dielektrisk anisotropi). Disse egenskapene kan benyttes til å påvise variasjoner i fiberretningen. Fiberretningen kan derfor bestemmes av mikrobølgens polarisasjon. Polariseringen er uttrykt med forholdet mellom polariseringskomponentene på tvers (krysspolar) og på langs (copolar) av innfallende mikrobølges polariseringsretning. Dersom bølgen polariseres i en tilstrekkelig vinkel på fiberretningen og objektet er tilstrekkelig bredt, vil således en målbar krysspolarisert bølge bli generert (vinkelen bør være større enn 5°). Denne er elliptisk og ellipsens minste akse tenderer mot fiberretningen [4]. De lokale endringer i fiberhelling rundt kvister er vanskelig målbart og trolig heller ikke spesielt viktig for fasthetsegenskapene. Derimot er fiberhelling som skyldes spiralvekst av stor betydning. En fiberhelling på 15 grader kan typisk redusere styrken med opptil 50 prosent sammenlignet med parallelle fibre [6]. Ved lengdemåling kan en bestemme et tilnærmet eksakt bilde av fiberhelling fra topp til rot. Fiberhelling som skyldes spiralvekst vil holde seg tilnærmet konstant over lengden. Denne observasjonen gjør at en ikke nødvendigvis er avhengig av å måle hele stykkets lengde. Ved å benytte flere transdusere kan fiberhelling som skyldes spiralvekst derfor påvises ved tverrmåling [1].

### 3.7.3.5 Registrering av kvister

Kvister i trevirket gir varierende resultater. Endringer i densitet, fuktighet og fiberforstyrrelser gir komplekse endringer i mikrobølgen, noe som trolig gjør det vanskelig å modellere matematisk. Dermed foretrekkes empiriske metoder [2].

### 3.7.3.6 Mulige prototyper

I 1985 viste Kharaldy [3] prinsippene bak prototypen på en mikrobølgebasert styrkesorteringsmaskin. Den består i prinsippet av tre moduler som til sammen måler de antatt viktigste styrkemessige parametre.

- Modul for samtidig måling av densitet og fuktighet.
- Modul for måling av fiberhelling.
- Modul for måling av kvist og andre defekter, primært på kantsidene.

Det ble henvist til at University of British Columbia jobbet med denne problematikken. En mekanisk enhet for måling av elastisitetsmodul er planlagt integrert i systemet.

Leicester beskriver [2] utviklingen av en kommersiell mikrobølgebasert styrkesorteringsmaskin basert på [3]. Det var anslått en utviklingstid på kun ett år, noe som står i kontrast til utviklingstiden på andre kjente systemer. Imidlertid ble det besluttet å utsette utviklingen av den kombinerte densitets- og fuktighetsmodulen, da dette ble for komplekst for den første prototypen. Med et frekvensvalg på 10 GHz ble det mulig å detektere kvist ned mot 10 mm bredde, en høyere frekvens ble vurdert å sette for store krav til elektronikken. I tillegg til mikrobølger, skal en mekanisk bøyeeenhet integreres i systemet. Det er intensjonen å oppnå en driftshastighet på 300 m/s. Det er ikke sagt noe om oppnådde bøyefasthetskorrelasjoner. Det blir imidlertid interessant å sammenligne data fra mekanisk bøyep prøving med mikrobølge-enhetene.

### 3.7.3.7 Fordeler og ulemper

Mikrobølger har en rekke egenskaper som gjør teknikken aktuell som et verktøy for styrkesortering og annen utvelgelse av trevirke. Spesielt kan fremheves:

- Densitet og fuktighet kan måles.
- Fiberhelning og andre fiberforstyrrelser kan måles.
- Kvist og eventuelt andre virkesfeil og defekter kan måles tredimensjonalt.
- Industrihastigheter kan oppnås.
- Berøringsfri kontroll med tilstrekkelig kobling i luft mellom antenne og objekt.
- Systemene er enkle å automatisere.
- Relativt billig utstyr og ingen problemfylt drift.
- God oppløsning kan oppnås ved fokusering og frekvensvalg.
- Målingen kan gjøres berøringsfri, det er gode koblingsegenskaper mot luft.

Måling av densitet og fiberhelling med mikrobølger fungerer best ved lav og kontrollert fuktighet. De elektriske egenskaper til vann og trevirke er såpass forskjellige at det oppstår et økende problem ved økende vanninnhold. Vannets egenskaper vil etterhvert helt dominere, noe som vanskeliggjør måling av rå last.

Faren for personskader pga. stråling er relativt liten ved bruk av mikrobølger. Installasjoner og utstyr bør imidlertid beskyttes og kontrolleres av fagfolk.

## 3.7.4 Røntgen- og gammastråler ( $\gamma$ -stråler)

### 3.7.4.1 Innledning

Røntgen- og gammastråler er kortbølget elektromagnetisk stråling. Røntgenstråling ligger plassert mellom ultrafiolett stråling (lengre bølgelengde) og gammastråling (kortere bølgelengde). Bølgelengdens grenseverderi for skille mellom de enkelte strålingstypene er

ikke entydig definert. Definisjon av hva som er røntgen- og gammastråling gjøres på bakgrunn av hvilken metode som anvendes for å framstille strålingen. Mens røntgenstråling oppstår når det skjer forandringer i energitilstanden hos elektroner (frie eller bundet i atomer), har gammastråling sin opprinnelse i atomkjernen.

#### **3.7.4.2 Teoretisk grunnlag**

Røntgenstråling lages vanligvis ved å stoppe en elektronstråle i et tungt stoff. Det vanligste apparatet for å frambringe røntgenstråling er såkalte røntgenrør, men også andre elektronakseleratorer (f. eks. betatron) blir brukt. En vil også få røntgenstråling når den primære radioaktive strålingen ( $\alpha$ -,  $\beta$ - og  $\gamma$ -stråling) stoppes.

Gammastråler ( $\gamma$ -stråler) er elektromagnetiske stråler som sendes ut fra atomkjerner. Opprinnelig ble betegnelsen brukt på den del av de radioaktive strålene som var mest gjennomtrengende, ikke virket ioniserende langs sin bane og ikke ble påvirket av magnetiske eller elektriske felt. Som kilde for gammastråling brukes forskjellige isotoper (f.eks. Iridium-192 og Americium-241). Gammastråler er av samme natur som røntgen, men har kortere bølgelengde.

#### **3.7.4.3 Måling av densitet og kvist**

Når en røntgen- eller gammastråle passerer gjennom et materiale, vil en viss mengde av strålingen bli absorbert. Hvor mye, er avhengig av materialets tykkelse (volum) og densitet. Desto høyere densitet materialet har, desto mere vil absorberes for samme tykkelse. Følgelig kan densiteten beregnes, når en kjenner dempning og objektets tykkelse. Dersom materialet består av varierende densitet (f. eks. trevirke med kvister), vil absorpsjonen/ dempningen variere og de forskjellige sonene kunne registreres. Størrelse og plassering av kvist kan derfor også bestemmes ved hjelp av denne metoden.

#### **3.7.4.4 Metoder**

Hvor mye og hvor nøye en skal registrere ved hjelp av røntgen- og/eller gammastråler, er avhengig av utstyret en bruker. Det er mulig å registrere én- to- og tredimensjonale bilder av objektene. Valg av metode vil nødvendigvis måtte bli et kompromiss mellom nøyaktighet og registreringshastighet (i denne forbindelse viktig for sorteringshastigheten).

Ved én-dimensjonal registrering vil densitet være den viktigste informasjonen. Eksempel på et slikt system er det norske BAS-systemet [10] som i dag eksisterer som en prototyp sorteringsmaskin. Gjennomlysningen (gammastråling) skjer fra kant til kant av plankene og har en oppløsning i lengderetningen på 10 cm. Måleenheten er relativt enkel og kan kun måle densitet. Prototypen opererer med en hastighet på 120 m/min (begrenset av omliggende mekanikk).

Ved to-dimensjonal scanning øker informasjonsmengden. Dette medfører blant annet en bedre kvistprediksjon. Eksempel på et slikt system er TINA [8] som har to gjennomlysningssystemer, stilt vinkelrett på hverandre

Den mest avanserte metoden er tomografisk scanning (CT = computer tomography) som ble utviklet på 60-tallet til medisinske formål. Denne består av et roterende røntgenrør og en kjede av detektorer. God oppløsning kombinert med rotasjonen gir mulighet til et detaljert 3-dimensjonalt bilde av objektet. Eksempel på volumelementer er (0,3 x 0,3 x 1) mm. På 80-tallet ble teknikken utnyttet til densitetsmålinger av trevirke i en lang rekke studier. (Mull 1984; Hattori 1985; Lindgren 1988). Det ble også gjennomført tilsvarende studier ved Norsk Treteknisk Institutt [9] med henblikk på å studere iboende egenskaper hos tømmer (resultatene er pr.dags dato ikke offentliggjort i rapportform). Informasjonen kan bli svært detaljert med hensyn til kvistposisjoner og andre densitetsvariasjoner. Det betyr at gode korrelasjoner mot bøyebryddfasthet bør oppnås i tørket virke. Det store problemet er imidlertid at teknikken *hittil* vist seg for kostbar og for tid- og ressurskrevende til produksjonsformål.

### **3.7.4.5 Fordeler og ulemper**

Flere egenskaper kan registeres ved én måling. Eksempel på dette er densitet, kviststørrelse, kvistplassering og tennar. Metodene er berøringsfrie og det er derfor teoretisk mulig å sortere ved høye hastigheter. Begrensing på dette vil normalt være mengden av redusert data kombinert med tilgjengelig databehandlingsutstyr (kfr. én-, to- og tredimensjonal registrering). En fordel med røntgen- framfor gammastråler er at et røntgenrør kan slås av når det ikke brukes. En gammakilde vil stråle kontinuerlig, men har på den andre side ikke risiko for å bli ødelagt på grunn av overopphetning, noe som kan skje ved røntgenrør. En gammakildes intensitet ändres med tiden.

Det vil benyttes store energimengder og faren for skadelig stråling er tilstede. Alle installasjoner må godkjennes av de nasjonale strålevernsinspeksjonen.

Slike anlegg kan bli relativt dyre. Dette skyldes både det primære utstyret (strålings- og registreringsenheter, databehandlingsutstyr) og det nødvendige tilleggsutstyret for å tilfredsstille kravene til personsikkerhet.

### **3.7.5 Referanser**

#### **3.7.5.1 Literatur - Mikrobølger**

- [1] Samson M. 1988. Transverse scanning for automatic detection of general slope of grain in lumber. Forest Products Journal. Vol.38, No. 7/8. Page 33-38.
- [2] Leicester R.H., Seath C.A., Breitingen H.O., Shakiba S.B. 1994. Development of a Commercial Microwave Stress-Grader. CSIRO Division of Building and Engineering, Melbourne, Australia. 9 Pages.
- [3] Kharaldy, M. 1985. Microwave diagnostics for stress-rating one dimension lumber. Proc. of Fifth Symposium on the Non-destructive Testing of Wood, Washington State University, Pullman, Washington, USA, Sept. page 445-464.
- [4] Yen, Y.-H. 1981. Microwave electromagnetic non-destructive testing of wood in real-time. PhD Thesis, University of Wisconsin, Madison USA, 161 pages.

- [5] King, R.J. Microwave homodyne systems. Stevenage, England: Peter Peregrinus Ltd.; 1978. 368 pages.
- [6] Boughton, G.N.1994. Superior sorting of timber using localised stiffness on edge. Proc. of Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia, July 11-July 15. Page 510-515.
- [7] Steele P.H., Neal S.C., McDonald K.A., Cramer S.M. 1991. The slope-of-grain indicator for defect detection in unplaned hardwood lumber. Forest Products Journal. Vol.41, No.1. Page 15-20.

### **3.7.5.2 Literatur - Røntgen og gammastråler**

- [8] Månsson, M. 1991; Experiences from modern gamma ray log scanners in sawmilling operation. Proc. 4th International Conference on Scanning Technology in the Wood Industry. 7 s.
- [9] Høløyen, S. 1988: Statusrapport NTNF-prosjekt PT 17.16948 - Iboende egenskaper i tømmer. Ikke-publisert internrapport NTI. (Resultatene fra prosjektet er delvis publisert ved diverse internasjonale konferanser. Det planlegges nå å samle delrapportene og foredragene slik at de kan publiseres som helhet)
- [10] Toverød, H. 1994. Berøringsfri automatisk sortering. Orientering til NTI's generalforsamling 3. juni 1994.
- [11] Harris, J.M. 1969. The use of beta rays in determining wood properties. New Zealand J. Sci 12 (2) 398-451
- [12] Olson, J.R.;Arganbright, D.G.1981: Prediction of mass attenuation coefficients of wood. Wood Science 14 (2) 86-90
- [13] Tiitta, M.;Olkkonen,H.;Lappalainen,T;Kanko,T.1993; Automated low energy photon absorption equipment for measuring distributions of wood samples. Holz als Roh- und Werkstoff 51 417-421
- [14] Lindgren O.;Davis J.;Wells,P;Shadbolt,P.1992:Non-destructive wood density distribution measurements using computed tomography. Holz als Roh- und Werkstoff 50 295-299

### **3.8 Neurale nett som metode for databehandling i forbindelse med styrkesortering**

#### **3.8.1 Innledning og bakgrunn**

Neurale nett er en metode hvor datamaskiner brukes til å lagre og skaffe informasjon ved å imitere oppførselen av den menneskelige hjerne. Historien om neurale nett startet på 40-tallet da McCulloch og Walter [Caudill & Butler 1990] prøvde å bygge en modell for hvordan menneskets hjerne virker. Deretter fortsatte man å anstrenge seg for å undersøke teknikker som støtter maskinsystemer slik at disse kunne gjøre noe av det samme som menneskets hjerne, bl.a. opplæringslover, minnestruktur og adaptasjonsregler. Noen av de systemene som ble laget var stemmeskriver [Kohonen], silikonretina [Mead] og abnormalitetdetektor for vektorcardiograf [Specht]. I dag har neurale nett utbredt anvendelse på mange områder, som for eksempel kvalitets- og prosesskontroll, maskinsyn og signalbehandling.

#### **3.8.2 Oppbygning og egenskaper**

Det er minneegenskaper hos hjernen man prøver å imitere i neurale nett. Hovedsakelig er det to preg av hjernens minne man er mest opptatt av, nemlig distributivt minne og assosiativt minne. Med et distributivt minne menes at hjernen lagrer informasjon fordelt på minnepunkter ("neuron" på engelsk) og i form av mønster. Med et assosiativt minne menes at hjernen lagrer informasjon ved å forbinde forskjellige typer informasjon med hver andre på bakgrunn av en gitt sammenheng.

Det enkelte minnepunkt lagrer informasjonen i dets vektmatrise. Hver vektkomponent i matrisen tilsvarer ett enkelt bindeledd som knytter dette punktet til et nabopunkt og bestemmer betydningen av nabopunktets signal i henhold til informasjonen som tilknyttes til det første punktet. Hvis resulterende virkning av alle nabopunkter er større enn en punktavhengig terskel (aktiveringsnivå) som tilknyttes dette punkt, tennes punktet et signal til beslutningspunktene. Dvs. neurale nett bestemmer status av informasjonen i et minnepunkt ikke bare basert på egenskapen av dette punktet, men også punkter det er knyttet til - verdier og vekter av signaler disse har sendt frem. Dette gjør at neurale nett tåler ufullstendig og unøyaktig informasjon.

Et vanlig neuralt nett består av tre lag - et inngangslag, et skjult lag og et utgangslag. Inngangslaget tar imot inngangssignalene til nettet. Det skjulte laget behandler inngangsdata og lagrer resultatet i sine minnepunkter. Utgangslaget tar beslutning og sender ut nettets avgjørelser.

Det skjulte laget kan bygges på flere måter enn hierarkisk som vist i figur 3.8.1, for eksempel kryssbar form som ved et gammelt koblingssystem for telefonsentralbord. Antall punkter i nettet må bestemmes på grunnlag av en avveining mellom nøyaktighet og effektivitet (beregningstid). Jo flere punkter, desto høyere nøyaktighet, men vanligvis lavere effektivitet.

Et neuralt nett kan bygges med eller uten tilbakekobling [Caudill & Butler 1990]. Tilbakekoblingen kan brukes til å korrigere systemets operasjonsfeil under trening eller under vanlig operasjon. Nett uten tilbakekobling pleier å være selvlærende og har evne til å oppsummere erfaringer og klassifisere data i henhold til oppsummeringen.

### 3.8.3 Læring

Det er to læreteknikker: a) styrt læring og b) ikke-styrt læring. Teknikk a) brukes til nett med tilbakekobling, og teknikk b) til nett uten tilbakekobling.

Trening på begge nettverkene begynner med å tilordne vilkårlige vektverdier til sine respektive minnepunkter. Når man tilfører treningsinformasjon til systemet, forandres vektverdiene og systemet bygger opp kunnskaper og erfaringer.

Ved ikke-styrt læring bruker nettet de følgende funksjoner [Souček 1989]:

- Aktiveringsnivå:

$$E_j = \sum \omega_{ji} \cdot p_i + b_{ji}$$

hvor  $\omega_{ji}$  er vekt fra minnepunkt  $i$  til  $j$

$p_i$  er utgangssignal fra punkt  $i$

$b_{ji}$  er bias av minnepunkt  $j$

- Utgangssignal av punkt  $j$ :

$$p_j = P(E_j) = \frac{1}{1 + e^{(-\beta \cdot E_j)}}$$

Ved styrt læring blir vektor korrigerert hos de enkelte punkter og "delta-regelen" kan brukes for å bestemme vektforandringer [Caudill & Butler 1990]:

$$\Delta \omega_j = \mathbf{p}_i \cdot \frac{f_j \delta q_j}{(\sum \omega_{ji}^2)}$$

|      |                        |                                                                                                                    |
|------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| hvor | $\Delta \omega_j$      | er korrigeringsvektor for et minnepunkt. Dens komponenter tilsvarende forandringer for de enkelte vekt-komponenter |
|      | $\mathbf{p}_i$         | er inngangssignal-vektor for minnepunktet                                                                          |
|      | $\delta q_j$           | er differansen mellom den virkelige og den antatte verdien for utgangssignalet                                     |
|      | $f_j$                  | koeffisient                                                                                                        |
|      | $\omega_{ji}$          | er vekt fra minnepunkt $i$ til $j$                                                                                 |
|      | $(\sum \omega_{ji}^2)$ | kvadrat av lengde av vekt-vektor for punkt $i$                                                                     |

Treningsprøver må være omfattende om egenskaper som skal besluttes. Det betyr to ting:

- Antall treningsprøver må være stort nok til at de fleste reelle tilfeller er dekket,
- Treningsprøver må velges fornuftig slik at systemet får effektive kunnskaper om virkeligheten.

### 3.8.4 Neurale nett mot regelbasert system

Generelt har neurale nett to fordeler hva gjelder industrianvendelse:

- det er lett å få til automatisk opplæring
- det er godt egnet til å løse et problem eller kunne ta avgjørelse på basis av ufullstendig og unøyaktig informasjon.

Et neuralt nett kan i mange tilfeller erstatte et regelbasert ekspertsystem. Sammenligner vi de to alternativene, kan neurale nett fordelaktig brukes til kompliserte problemstillinger hvor mange varianter og stort volum med informasjon er involvert, og det ikke finnes veldefinerte numeriske regler for å løse problemet.

### 3.8.5 Neurale nett for styrkesortering

For å effektivt anvende et slikt system til styrkesortering, er det viktigst at inngangslaget er fornuftig oppbygd. Dette betyr et effektivt utvalg av inngangssignaler og fornuftige inngangskanaler. Signalene til nettet må i størst mulig grad presentere informasjon om trevirkets styrke, men må samtidig involvere minst mulig støy eller unødvendige komponenter. Utvalg av inngangssignaler kan for eksempel ta hensyn til følgende faktorer:

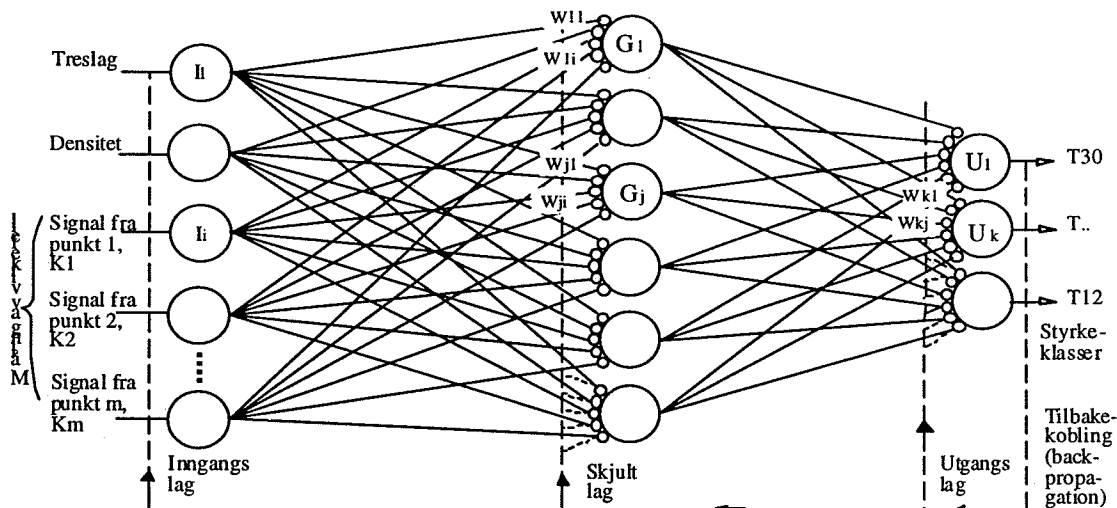
- Treslag
- Densitet
- Fuktighet
- Tverrsnittsdimensjon (bredde og høyde)
- Lengde
- Virkesfeil (type, størrelse, orientering, beliggenhet osv)

I forbindelse med det siste punktet er det en rekke målemetoder som f. eks. ultralyd, mikrobølge, røntgen, kjernemagnetisk resonans (NMR), kamerateknikk og bøyestivhet. Således har man en dataserie  $\{K_m\}$  som er knyttet til de konkrete utvalgte målemetodene, hvor indeks  $m$  står for sekvenstall for et målepunkt. Man kan enten bruke disse punktvis data eller deres resulterende resultater som in-put til nettverket. Det er opp til effektiviteten hvorvidt dataene presenterer virkesfeil eller mekaniske egenskaper.

Det er et problem man må legge merke til når man benytter punktvis data. Planker som skal måles/sorteres vil normalt ha ulike lengder. Dette medfører at antall punkter som blir målt varierer fra en planke til annen under vanlige operasjonsbetingelser hvor plankehastighet og datainnsamlingsfrekvens er konstante. Et ferdig konstruert nett har imidlertid et bestemt antall inngangskanaler for å ta imot signaler. Antall målepunkter bør være identisk med antall inngangskanaler.

Problemet kan løses ved å bygge et nettverk med det antall inngangskanaler som trengs for den største aktuelle plankelengden hvor én kanal tar imot data bare fra ett punkt. Når en kortere planke skal sorteres, vil noen kanaler bli ledige. Man kan mate disse kanalene med data fra siste målepunktet. Utfylling av ledige kanaler gjør ikke noen skade på

sorteringsresultatet da det er type og størrelse av den alvorligste virkesfeil som bestemmer plankens styrke, ikke posisjon i lengderetning.



Figur 3.8.1. Et neuralt nettverk for maskinell styrkesortering.

Dersom metoden for bøyebaserte maskiner alene er valgt, kan man bruke  $K_m = P_m / \delta_m$  (sorteringskraft dividert på deformasjon) til å presentere et målt punkt. En er imidlertid ikke avhengig av å ha bare én inngangsverdi i et målt punkt. Dersom en tenker seg bruk av røngenstråling (densitet, fuktighet, kviststørrelse og plassering) kombinert med stivhetsmålinger ( $P_m / \delta_m$ ), kan alle disse data benyttes samtidig. En fordel med for eksempel røntgenstråling er at hyppigheten av målepunktene kan være stor. En situasjon hvor røntgenmålingen tas for hver 10 mm kombinert med en stivhetsmåling for hver 150 mm, er ingen umulighet. Diverse data fra røntgenmåling legges inn i hvert målepunkt, data fra stivhetsmåling legges i tillegg inn i (f. eks) målepunkt 1, 16, 31 osv. På denne måten vil mulighetene til å korrigere stivhetsmåling (ekstreme feilverdier) i forhold til røntgenverdiene være en ekstra styrke for systemet. Et neuralt nett som vist i Figur 3.8.1 kan være en slik løsning.

### 3.8.6 Fordeler og ulemper

Et slikt system har følgende potensielle fordeler:

- Robust mot støy, f.eks. vibrasjonen ved plankens innposisjonering.
- Mulig å forbedre operasjonsnøyaktighet.
- Har fleksibilitet til å takle varierende plankelengde.
- Lett å kombinere forskjellige målemetoder/informasjonstyper (stivhet, røntgen, kamerateknikk, ultralyd osv.).

Vedrørende første punkt, kan dette forstås ved å tenke at det neurale nettet alltid tolker inngangssignaler basert på mønstergjenkjenning. I og med at vibrasjoner/svingninger i planken ofte befinner seg i samme målepunkt og/eller gir samme mønsterform, vil nettet oppfatte dette som felles for alle prøver og ikke bry seg om dette. Således søker nettet andre

særpreget for å skille mellom prøvene. Kombinert med andre data (f. eks. røntgen) vil nettet dessuten kunne overstyre feilmålinger direkte ved å vektlegge de forskjellige inngangssignalene forskjellig.

I dag eksisterer det egne firma/konsulentkontor som har spesialisert seg på neurale nettverk. Dette vil lette mye av utviklingsarbeidet for eventuelle framtidige systemer.

Av mulige ulemper kan følgende nevnes:

- Mange inngangsvariabler, således lang beregningstid.
- Enkelte inngangsdata kan være vanskelige å modelere, f.eks. kvistplassering.
- Vanskelig å kontrollere beslutningsstrategier i systemet.

Mange av de problemene en vil stå overfor er ikke av teknisk eller materialteknisk art, men snarere et kapasitetsproblem med hensyn til datakraft (rask bearbeidelse av data). Skal et sorteringssystem fungere tilfredsstillende vil det også måtte stilles krav til produksjonshastighet under vanlig drift.

### **3.8.7 Litteratur**

Caudill M. & C. Butler. 1990. Naturally Intelligent Systems. A Bradford Book, The MIT Press.

*Souček*, B. 1989. Neural and Concurrent Real-Time Systems - The Sixth Generation. A Wiley-Interscience Publication, John-Wiley & Sons, New York.

### **3.9 Fuktkvotsmätning i löpande produktion**

#### **3.9.1 Mätmetoder**

Det finns idag på marknaden utrustning för mätning av fuktkvot i löpande produktion. Dessa mätutrustningar använder olika mätprinciper för bestämning av virkets fuktkvot. De mätprinciper som används mest är elektrisk resistans, dielektricitet och gammastrålning. Gammastrålning används oftast som komplement till dielektricitet för bestämning av virkets densitet. Med vetskap om virkets densitet kan noggrannheten på mätmetoden förbättras väsentligt.

#### **3.9.2 Noggrannhet**

Noggrannheten för resistans- och dielektricitetsmetoden ligger i praktiken inom  $\pm 1,5\%$  (fuktkvotsprocent) i fuktkvotsintervallet 8 - 12% och inom  $\pm 3,0\%$  från 12 - 20%. Kompletteras dielektricitetsmetoden med densitetsmätning med gammastrålning förbättras noggrannheten väsentligt.

#### **3.9.3 Resistans**

Träets ledningsförmåga påverkas av ett flertal faktorer där fuktkvoten är den som har klart störst inverkan. De faktorer som har påverkan på ledningsförmågan är fukttinnehåll, temperaturen, mätriktningen, kemiskt innehåll, mätspänningens storlek, mättidens storlek och densiteten. Resistansmetoden är en berörande metod i form av borstar eller stiftliknande elektroder. Borstarna ansluter mot virkesytan när virkesbitarna passerar förbi i en produktionslinje. Stiftelektroderna slås in i virket vilket medför två små hål med en diameter på ca 1,5 mm och ett djup på 10 - 20 mm. Mätning med stift medför att virkesstyckena måste ligga still i några sekunder medan mätning utförs. Hela mätproceduren med borstar och stiftelektroder utförs helt automatiskt. Mätning med stiftelektroder medför stor känslighet för fuktgradient i virket. Mätutrustningar som använder stiftelektroder är vanliga i limträfabriker för allkontroll av fuktkvoten. Borstutförandet används mest i hyvlingslinjer eftersom det klarar den höga matningshastigheten

#### **3.9.4 Dielektricitet**

De dielektriska egenskaperna för trä är starkt beroende av träets fuktkvot. Andra faktorer som påverkar är träets densitet, temperatur, mätriktning och växelströmsfrekvensen. Den dielektriska metoden är beröringsfri och klarar ett kontinuerligt flöde av virkesstycken som matas på tvären eller längden. Metoden är relativt okänslig för fuktkvotsgradienter i virket. Mätutrustningen kräver dock en relativt omfattande kalibrering på plats för alla förekommande träslag och dimensioner. Dielektriska mätutrustningar förekommer mest på sågverk i deras justerverk. Det senaste åren har denna mätutrustning förbättrats med en densitetsmätare som använder sig av gammastrålning. Denna utrustning har ej ännu kommit ut i stor skala men den finns tillgänglig och kan inom en snar framtid öka i antal på sågverken. En stor fördel med densitetsmätningen är att den kan användas till annat än att förbättra fuktkvotsmätningen. Densiteten har nämligen en stor inverkan på många faktorer såsom sprickbildningen vid torkning och hållfastheten.

### 3.9.5 Övriga metoder

Det finns fler möjliga metoder för bestämning av fuktkvoten. Dessa metoder är tex IR-mätning. Virket värms under en mycket kort tid och avsvlningshastigheten är ett mått på virkets fukttinnehåll. Denna metod har dock ej fått någon utbredning i Norden på grund av stor osäkerhet i mätresultaten på furu och gran i de dimensioner vi tillverkar (16 - 100 mm). Utvecklingen idag strävar efter att förbättra mätnoggrannheten hos de redan använda metoderna. Detta göres genom en kombination av mätmetoderna på olika sätt. För forskningsändamål används även NMR, Nuclear Magnetic Resonance, och röntgenstrålning. Dessa metoder är oftast mycket dyra och komplicerade. Vidare finns När-Infraröd Reflektionsspektroskopi (NIR), som omtalt i kapitel 3.4.

### 3.9.6 Fabrikat/Leverantörer

Detta är inte en heltäckande förteckning, det finns många fler leverantörer i utlandet.

|                     |                                                                      |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Mätmetod resistans: | BES Bollmann<br>Lignomat<br>Delmhorst/Rema Control<br>Gann/Stenbergs |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------|

|                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| Mätmetod dielektricitet: | Wagner/Rema Control |
|--------------------------|---------------------|

|                       |                                           |
|-----------------------|-------------------------------------------|
| Mätmetod kombinerade: | Wagner/Rema Control<br>Finnomoist/Innotec |
|-----------------------|-------------------------------------------|

### 3.10 Dekonvolusjonsteknikk for styrkesortering

#### 3.10.1 Bakgrunn

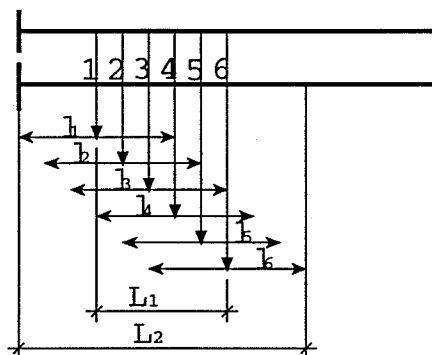
Dekonvolusjon er en teknikk som er brukt til å avdekke detaljer ved et fenomen gjennom å måle og analysere en rekke samordnete informasjoner om fenomenet. Teknikken er kjent fra blant annet datatomografi hvor stråler brukes til å gjennomlyse testobjektet i flere retninger. Objektets retningsmessige virkninger på strålene måles og kombineres for å gjengi dets detaljer (bilde) i tverrsnittet hvor målingene er gjort.

#### 3.10.2 Prinsipp

Prinsippet baserer seg på at det er lett å ha ikke-destruktiv adgang til testobjektets samordnete egenskaper mens det ikke er mulig å måle detaljene direkte.

Anvendelse av dekonvolusjonsteknikken til styrkesortering kan ta utgangspunkt i følgende fakta [Bechtel 1985; Foschi 1987]:

1. Ved bestemmelse av sorteringsklasse er en interessert i det svakeste *punktet*. E-modul i dette punktet har statistisk god korrelasjon med korresponderende (minimums-) fasthet. Ved bøyebaserte styrkesorteringsmaskiner måles ikke en punktvis E-modul (egentlig stivhet), men en gjennomsnittlig E-modul (stivhet) over den aktuelle bøyelengden.



*Figur 3.10.1 Prinsippskisse for 6 målepunkter og deres korresponderende målelengder. I området gitt av lengden  $L_1$  eksisterer det 6 målepunkter. Hvert målepunkt representerer en midlere stivhet for sin målelengde  $l_n$ .  $L_2$  er den samlede lengden de 6 målepunktene er registrert over.*

2. Det kan settes opp en teoretisk modell for forholdet mellom midlere lengdeavhengige E-modulverdier og punktvis E-modulverdier.

Punkt 2 gir mulighet for at de punktvis E-modulverdiene tilnærmet kan beregnes. I følge Foschi har det vist seg at FFT ("Fast Fourier Transform") er et effektivt verktøy til dette.

Det er et praktisk problem som må takles når man benytter en slik dekonvolusjonsmetode. Metoden er en teoretisk model og kan, dersom det ikke oppsettes riktige grensebetingelser, gi "støy" i løsningen. Slike feilkilder kan enten skyldes feilmålinger eller numeriske avrundinger

i beregningen. For å unngå dette kan man kutte de høye frekvensene i Fouriertransformasjonen. "Kutt-frekvensen" kan finnes ved hjelp av en iterativ prosedyre. Det finnes to alternative teknikker som separat er utviklet av Foschi [1987] og Lam et al. [1993].

### **3.10.3 Kommentar**

Mens en tradisjonell bøyebasert styrkesorteringsmaskin baserer seg på å måle gjennomsnittlig MOE over bøyelengden, har undersøkelser vist at dekonvolusjonsmetoden kan gi et realistisk bilde av punktvis MOE-verdier med vilkårlig plassering innenfor plankenes hele lengde.

Metoden gir imidlertid ingen løsning på problemene med feilregistrering av maskinmålt MOE (svingninger, vibrasjoner, signalfeil e.l.). Sikre resultater fra dekonvolusjonsmetoden er fullstendig avhengig av at input-data er korrekt ("garbage in, garbage out").

Relatert til dagens bøyebaserte styrkesorteringsmaskiner med tidvise feilregistreringer, bør dekonvolusjonsmetoden kunne benyttes i kombinasjon med korreksjonsmetoder, f.eks. neurale nettverk.

### **3.10.4 Litteratur**

Bechtel, F. K. 1985. Beam stiffness as a function of pointwise E with application to machine stress grading. Proceedings of International Symposium on Forest Products Research, CSIR, Pretoria, South Africa.

Lam, F.; R.O. Foschi & Q.Y. He. 1993. Modified algorithm to determine localized modulus of elasticity of lumber. Wood Sci. Technol. 27:81-94.

Foschi, R.O. 1987. A procedure for determination of localized modulus of elasticity. Holz als Roh- und Werkstoff 45:257-260.

## 4 Maskiner på marknaden

### 4.1 Inledning

Konstruktionsvirke delas in i hållfasthetsklasser. I en hållfasthetsklass definieras virkets mekaniska egenskaper som böjhållfasthet, draghållfasthet, tryckhållfasthet, elasticitets- och skjuvmoduler, dvs de egenskaper som är nödvändiga vid dimensionering. Vid hållfasthets-sortering av virke, visuell eller maskinell, sorteras virket in i olika sorteringsklasser vilka sedan kan hänföras till hållfasthetsklasserna. Det krävs då att man kan visa att virke i en speciell sorteringsklass har mekaniska egenskaper som uppfyller kraven i den aktuella hållfasthetsklassen. Beroende på träslag kan det vara olika egenskaper som är avgörande för vilken hållfasthetsklass virket kan placeras i men oftast är det böjhållfastheten som avgör.

Maskinell hållfasthetssortering bygger på att det finns ett samband mellan exempelvis hållfastheten och en eller flera andra mätbara materialegenskaper såsom exempelvis

- densitet
- kvistars storlek och läge
- elasticitetsmodul
- snedfibrighet
- sprickors storlek och läge
- hastigheten med vilken olika typer av signaler transporteras genom virke

Det finns en rad olika metoder för att på ickeförstörande sätt mäta och bestämma dessa egenskaper. I Tabell 4.1 ges exempel på användbara metoder för mätning av olika egenskaper hos trä:

Tabell 4.1 Exempel på metoder för bestämning av diverse egenskaper.

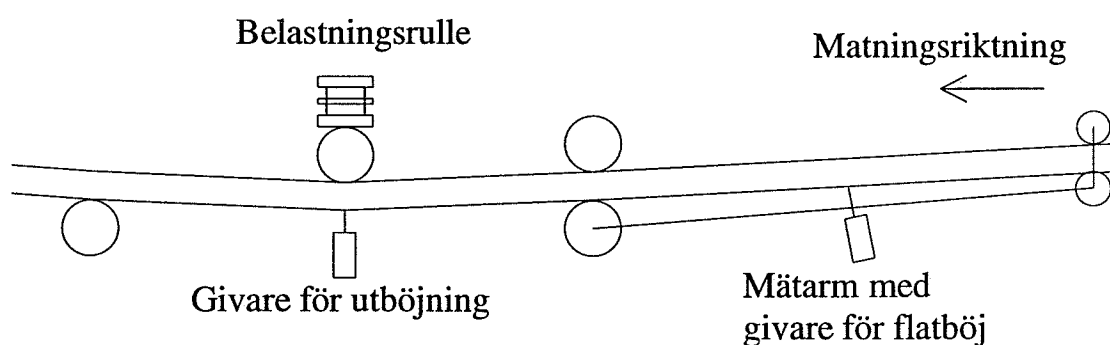
| Metod                                 | Egenskaper                                         |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Röntgenstrålning, gammastrålning      | Densitet, kvistars läge och storlek                |
| Micro-vågor                           | Kvistars läge och storlek, snedfibrighet, fuktkvot |
| Mekanisk böjning                      | Elasticitetsmodul                                  |
| Vibrationsmetoder, resonansfrekvenser | Elasticitetsmodul                                  |
| Stötvågor, ultraljudspulser           | Elasticitetsmodul                                  |
| Infraröd strålning                    | Temperatur                                         |
| CCD-kamera                            | Synliga defekter som kvistar                       |
| Elektriska metoder                    | Fuktkvot                                           |

Vilka egenskaper dessa metoder har framgår i någon mån av kapitel 3. Det är främst metoder med mekanisk utböjning som har kommit till praktisk användning hittills. Men det finns även ett antal maskiner där andra mätmetoder används.

## 4.2 Computermatic

### 4.2.1 Princip

Computermatic är en av de mest frekvent förekommande maskinerna idag. Maskinen böjer virket och den applicerar en konstant last på virket. Den av kraften resulterande utböjningen mäts med en släpgivare och registreras i binär form. För att kompensera för eventuell initialkrokighet använder Computermatic en särskild mätarm vilken är monterad på inmatningssidan. Virkets initialkrokighet mäts också med en släpgivare och mätvärdet subtraheras från den utböjning som senare mäts vid belastningspunkten. Det resulterande värdet, dvs utböjning minus initialkrokighet, är därmed den parameter vilken används för att bestämma vilken klass virket kommer att sorteras i. I Figur 4.1 visas en principskiss av Computermatic.



Figur 4.1 Principskiss av Computermatic.

Virket belastas normalt med en konstant böjspänning,  $\sigma$ , på 13.8 MPa (2000 psi). Lasten med vilken virket skall belastas kan då beräknas enligt följande:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma \cdot h \cdot t^2}{3 \cdot L} \quad (4.1)$$

där  $h$  är virkets bredd,  $t$  är tjockleken och  $L$  är spannet mellan upplagsrullarna (914 mm = 36"). Belastningen sker pneumatiskt och inställningen sker i två steg. Först anges antalet belastningscylindrar (1 till 3 stycken) och sedan sker en justering av lufttrycket via en tryckventil där trycket kan avläsas på en manometer. För att belastningen skall bli riktig kalibreras maskinen, i Sverige två gånger årligen, och en kalibreringskurva tas fram som visar verklig belastningen vid olika lufttryck och antal cylindrar.

När virke matas genom maskinen mäts utböjning och initialkrokighet med ett intervall av 152 mm (6"). Utböjning och initialkrokighet mäts med en upplösning på 1 bits = 0.1905 mm (bits är den enhet tillverkaren använder). Mätnoggrannheten beror på vilken dimension och sorteringsklass som sorteras. För grovt virke kan noggrannheten vara tveksam. Exempelvis är kravet för virke med tjockleken 70 mm att utböjningen skall vara mindre än 16 bits för att sorteras i T30M. Felet kan då bli över 6%. Avståndet från virkets inmatningsände till första mätpunkten kan variera mellan 500 - 750 mm.

På nya Computermatic sker matning av virket med matarrullar både på inmatnings- och utmatningssidan. På äldre maskiner fanns endast matning på inmatningssidan.

Det finns ett stort antal undersökningar där Computermatic har studerats. Exempelvis Solli (1993), Johansson m fl (1992), Boström (1994a), Boström (1994b) och Johansson och Claesson (1989).

#### **4.2.2 Hastighet**

Matningshastigheten är variabel mellan 65 - 150 m/min. Normal hastighet (i Sverige) är 65 - 100 m/min. I Australien körs maskinen upp till 200 m/min, Leicester (1994).

#### **4.2.3 Precision**

Korrelationen mellan böjstyvheten uppmätt med Computermatic och den statiska böjhållfastheten på högkant ligger normalt i området  $r^2 = 0.4 - 0.6$  vid sortering under bra förhållanden, dvs vid låg hastighet ( $\approx 50$  m/min) och hyvlat virke. Vid sortering under normala förhållanden, dvs sågat virke, normala hastigheter (100 m/min), sjunker korrelationen och ett normalt värde är omkring  $r^2 = 0.25$ .

#### **4.2.4 Fördelar - nackdelar**

Ett problem med maskinen är de svängningar eller vibrationer som uppstår då virket belastas. Dessa svängningar registreras av maskinen och kan leda till en nedklassning av virket. Problemet är störst vid de 5-6 första mätpunkterna. Efter detta har svängningarna dämpats så de inte påverkar mätningen.

Mätning av utböjning sker med en släpgivare som registrerar resultatet binärt. Upplösningen på denna givare är 0.1905 mm, vilket för grova virkesdimensioner innebär att kravet som ställs i den Europeiska standarden EN519 inte uppfylls.

Computermatic finns även som en billighetsversion kallad Micromatic. Skillnaden är framför allt att Computermatic har en växellåda (nya maskiner har frekvensstyrning) och därmed variabel hastighet. Micromatic har en fast hastighet på 65 meter/minut.

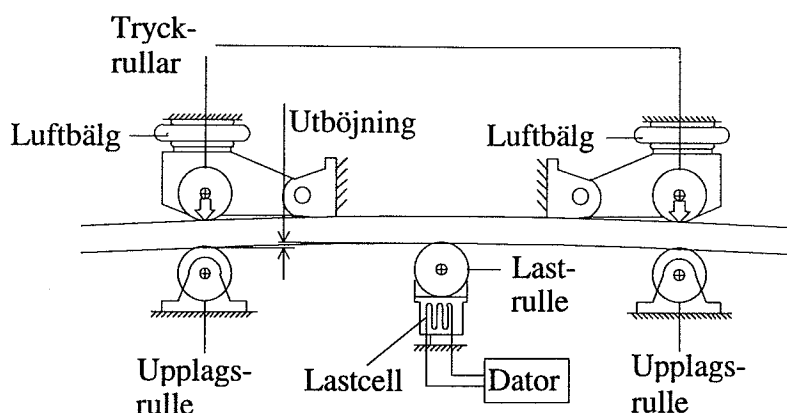
Priset för en Computermatic är i storleksordningen £ 40.000 - 60.000 beroende på modell.

### **4.3 Tecmach (fd Cook-Bolinder)**

#### **4.3.1 Princip**

Tecmach är en böjande maskin. Den mäter den kraft som krävs för att ge virket en bestämd utböjning. Detta innebär att operatören ställer in en viss förutbestämd utböjning, vilken varierar beroende på virkesdimension. Utböjningen ligger normalt inom området 2 - 7 mm. Maskinen har matning på både inmatnings- och utmatningssidan. Avståndet mellan inmatnings- och utmatningsrullarna är 900 mm och mitt emellan dessa sitter en rulle vilken ger virket dess utböjning. På denna utböjningsrulle sitter en lastcell monterad. Lasten mäts

varje 100 mm längs virkesstycket förutom de första och sista 480 mm av virkesstycket. I Figur 4.2 visas en principskiss av maskinen.



Figur 4.2 Principskiss av Tecmach.

Valet av utböjning beror på virkets tjocklek och i manualen för maskinen anges utböjningar för olika virkestjocklekar.

För att kompensera för virkets initialkrokighet får virket passera genom maskinen två gånger, och innan andra körningen vrids virket 180°. Maskinen bildar ett medelvärde av lastmätningen i varje punkt och det lägsta medelvärdet avgör vilket klass virket skall sorteras i. För att hastigheten inte skall bli för låg används ofta två i linje kopplade maskiner där den andra maskinen är vriden 180°.

Då Tecmach använder en förutbestämd utböjning av virket kommer böjspänningen inte att vara konstant utan beror på virkets elasticitetsmodul, virkets utböjning och dess tjocklek enligt följande:

$$\sigma = \frac{6 \cdot \delta \cdot E \cdot t}{L^2} \quad (4.2)$$

Då böjspänningen kan bli stor för virke med hög elasticitetsmodul, finns det på Tecmach luftbäljar monterade på mothållsrullarna. Detta innebär att mothållen kan fjädra tillbaka när belastningen blir större än ett visst förutbestämt värde. Trycket i luftbäljarna ställs in enligt en tabell som finns till maskinen och det är virkesdimensionen som avgör vilket tryck som skall användas.

Det finns ett stort antal undersökningar där Tecmach har studerats. Exempelvis Solli (1993), Johansson m fl (1992), Boström (1994a), Boström (1994b) och Perstorper m fl (1994).

#### 4.3.2 Hastighet

Hastighet för Tecmach är upp till 200 m/min.

### 4.3.3 Precision

Korrelationen mellan böjstyvhetsmätningen uppmätt med Tecmach och den statiska böjhållfastheten på högkant ligger normalt i området  $r^2 = 0.5 - 0.7$  vid sortering under bra förhållanden med låg hastighet (50 m/min) och hyvlat virke. Vid sortering under normala förhållanden, dvs sågat virke och hastigheter runt 100 m/min, sjunker korrelationen till omkring  $r^2 = 0.4$  på grund av vibrationer. Normalt är korrelationen alltså något högre med Tecmach än med Computermatic.

### 4.3.4 Fördelar - nackdelar

För att eventuell initialkrokighet inte skall påverka mätningen krävs att virket körs genom maskinen två gånger och då belastas i två olika riktningar. Alternativt att två maskiner installeras.

Maskinen använder en konstant utböjning av virket vilket ger en enkel konstruktion.

Vid höga hastigheter uppstår vibrationer vilka leder till felaktig mätning.

## 4.4 EuroGreComat

### 4.4.1 Princip

EuroGreComat är en ny maskin på marknaden. Det finns när detta skrivs totalt 6 maskiner i Tyskland och Österrike. Två varianter av maskinen finns, en för klenare dimensioner vilken har ett spann av 700 mm mellan upplagsrullarna, och en maskin för grövre virke med avståndet 1000 mm mellan upplagsrullarna. I övrigt är maskinerna identiska.

EuroGreComat använder två mätsystem för att sortera virket 1) böjstyvhetsmätning, och 2) röntgen, Palm (1995). Böjstyvhetsmätningen sker genom mätning av den kraft som krävs för att ge virket en bestämd utböjning. Avståndet mellan inmatnings- och utmatningsrullarna är 700 alternativt 1000 mm och mitt emellan dessa sitter belastningsrullen vilken ger virket dess utböjning. På denna belastningsrulle är en lastcell monterad. Lasten mäts varje 10 mm längs virkesstycket förutom de första och sista 350 alternativt 500 mm av virkesstycket. Lastmätningen sker med två lastceller kopplade på var sin sida av belastningsrullen. Anledningen är att vid mätning av virke med liten bredd snedbelastas belastningsrullen.

För att kraftmätningen skall ske med så god noggrannhet som möjligt regleras utböjningen kontinuerligt. Maskinen beräknar böjspänningen i virket med antagandet att elasticitetsmodulen är 10.000 MPa. Utböjningen justeras sedan så att böjspänningen ligger i intervallet  $\sigma_m = 8.4 - 12$  MPa.

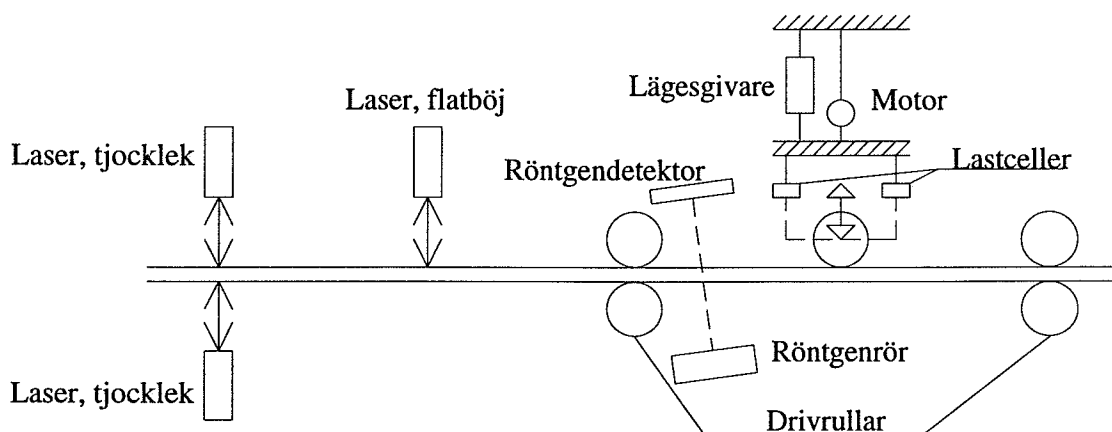
Med röntgenutrustningen mäts densiteten och kvistar. Dessa mätningar används vid sorteringen genom att en så kallad sorterings-E-modul beräknas enligt följande:

$$E_{\text{sortering}} = C_0 + C_1 \cdot E_{\text{maskin}} + C_2 \cdot K + C_3 \cdot \rho \quad (4.3)$$

där  $C_n$  är konstanter,  $E_{maskin}$  är elasticitetsmodulen uppmätt i maskinen,  $K$  är måttet på kvistar och  $p$  är densiteten. Utrustningen kan detektera kvistar med storleken 5 mm och uppåt. Detektorn har 288 element (pixels). Då röntgenmätningen ger en bild av hela virkesstycket kan även virkesbredden och kantkrokigheten bestämmas. Idag mäts endast kantkrokighet.

Strålningskällan arbetar med en konstant spänning på 45 kV, medan strömstyrkan varierar beroende på virkestjocklek och sorteringshastighet.

För uppmätning av initialkrokighet och virkestjocklek används 3 lasrar, se Figur 4.3. Maskinen har matning på både inmatnings- och utmatningssidan. I Figur 4.3 visas en principskiss av maskinen.



Figur 4.3 Principskiss av EuroGreComat.

#### 4.4.2 Hastighet

EuroGreComat är godkänd i Tyskland och Österrike för hastigheterna 80 och 120 m/min. Utveckling pågår för att få fram en maskin som klarar 150 m/min.

#### 4.4.3 Precision

Korrelationen mellan verklig densitet och uppmätt densitet är  $r^2 = 0.92$ . Korrelationen mellan  $E_{sortering}$  och statiska hållfastheten ligger i området  $r^2 = 0.6 - 0.7$ . Dessa korrelationer är givna av maskintillverkaren och någon uppgift om de förhållanden som rådde vid sorteringen finns inte.

#### 4.4.4 Fördelar - nackdelar

En stor fördel med EuroGroComat, jämfört med andra maskiner, är att operatören inte behöver göra några inställningar mer än, att på datorn ange virkets nominella dimensioner. Maskinen gör sedan alla inställningar automatiskt.

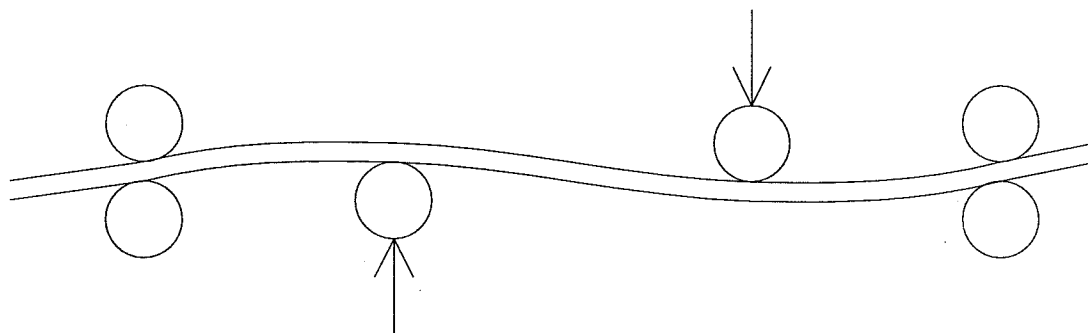
Maskinen är dyr. Priset för endast maskinen är omkring 450.000 DM, och fullt utrustad med inmatnings- och utmatningsanordningar samt märkutrustning hamnar priset på 600.000 DM.

Då maskinen använder röntgen krävs att operatören genomgår en speciell utbildning för handhavande av strålningsutrustning.

## 4.5 RauteTimgrader

### 4.5.1 Princip

Principen för Raute Timgrader är att virket böjs i två riktningar med konstant utböjning och att den kraft som krävs för att åstadkomma dessa utböjningar mäts. Då virket böjs i två riktningar beräknas utböjningskraften för ett tvärsnitt som medelvärdet av de två utböjningskrafterna. Krafterna mäts för varje 102 mm längs virkesstycket. Avståndet mellan matningsrullarna är 1020 mm och belastningen sker i fjärdedelspunkterna, dvs 255 mm från matningsrullarna.



Figur 4.4 Principskiss av Raute Timgrader.

### 4.5.2 Hastighet

Maskinens hastighet kan varieras mellan 38 m/min och 135 m/min

### 4.5.3 Precision

Korrelationen mellan böjstyvheten uppmätt med Raute Timgrader och den statiska böjhållfastheten på högkant ligger normalt i området  $r^2 = 0.4 - 0.8$ . Den bästa korrelationen fås för hyvlat, eller finsågat, tunt virke. Uppgifter om hastighetens inverkan saknas.

### 4.5.4 Fördelar - nackdelar

En nackdel med maskinen är risken för sprickbildning hos torra breda virkesstycken p.g.a. att virket böjs i S-form.

Vid höga hastigheter kan virkesstycket vibrera vilket påverkar resultatet. Vidare kan sorteringsmaskinens och den omgivande apparaturen vibrera vilket också påverkar mätningen.

Då virkesstycket böjs i två riktningar kompenseras effekten av initialkrokighet direkt.

## 4.6 Metriguard CLT and Model 7200

### 4.6.1 Princip

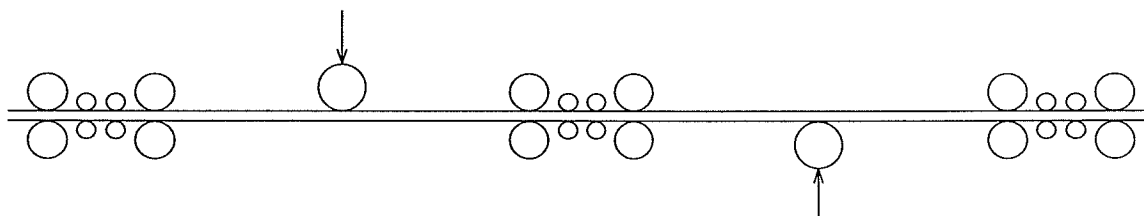
Metriguard tillverkar två maskiner, CLT Continuous Lumber Tester och Model 7200 LS Lumber Tester. CLT svarar för det mesta av det virke som sorteras maskinellt i Nordamerika. Den första maskinen sattes i produktion 1962. Sedan dess har maskinen modifierats och förbättrats ett antal gånger. CLT finns idag i USA, Kanada, Australien och Nya Zeeland. I Europa finns när detta skrivs ingen maskin.

Båda maskinerna mäter virkets böjstyvhetsmetoden och principen är, att kraften för att ge virket en bestämd utböjning mäts, Bechtel (1995), Metriguard (1994). Böjstyvhetsmätningen sker över ett spann av 1219 mm (4 ft), och för att kompensera för eventuell initialkrokighet görs mätningen i två riktningar. Maskinerna har tre uppsättningar med klämror vilket ger en fast inspanning av virket. Mellan de två första uppsättningarna klämror sker den första mätningen, och mellan de två sista seten böjs virket i motsatt riktning. Att en fast inspanning av virket används har flera orsaker:

- att förhindra att de båda mätningarna skall påverka varandra
- att inmatnings- och utmatningsutrustning inte skall påverka mätningen
- att undvika dynamiska effekter som svängningar och vibrationer som kan uppkomma vid sorteringen.

Ett medelvärde bildas av de två mätningarna och från detta värde beräknas en lokal E-modul. Dessutom beräknas ett medelvärde av E-modulen längs hela virkesstycket. I Nordamerika används både den lokala E-modulen och medelvärdet av E-modulen för att bestämma sorteringsklass. Det finns också länder där endast den lokala E-modulen används. Det finns även möjlighet att kontinuerligt märka virket i 5 olika kategorier, vilket görs i Australien och Nya Zeeland.

Normalt levereras maskinen för sortering av de nordamerikanska virkesdimensionerna: 2'x3', 2'x4', 2'x6', 2'x8', 2'x10' och 2'x12'. Det finns möjlighet att även sortera i metrisk dimensioner. För CLT gäller då följande dimensioner: 35 - 52 mm för tjockleken och 63 - 290 mm för bredden, och för Model 7200 LS: 20 - 52 mm för tjockleken och 50 - 300 mm för bredden.



Figur 4.5 Principskiss av CLT

#### 4.6.2 Hastighet

Maskinens hastighet kan väljas inom ett stort område av beställaren. Normalhastigheten är 180 meter/minut, men det finns valmöjligheter mellan 100 - 600 meter/minut.

#### 4.6.3 Precision

Korrelationen mellan böjstyvhetsmätning i maskinen och den statiska hållfastheten ligger i området  $r^2 = 0.5 - 0.6$ . Denna korrelation har uppgivits av maskintillverkaren. Uppgifter om hastighet, typ av virke osv finns inte.

#### 4.6.4 Fördelar - nackdelar

Maskinen kan enligt uppgift köras med en mycket hög hastighet utan problem med svängningar och vibrationer. Detta har Metriguard löst med en avancerad inspänningsutrustning.

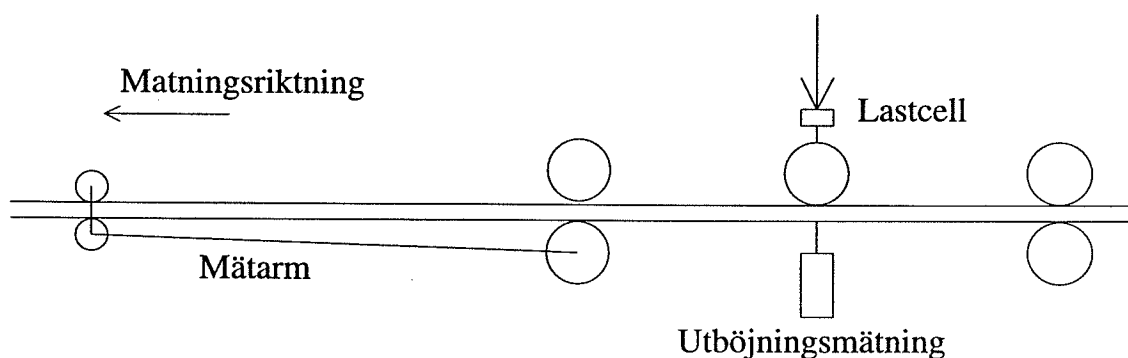
Priset för en CLT är omkring U.S.\$ 185.000 och för Model 7200 LS omkring U.S.\$ 110.000.

### 4.7 Dart (Eldeco)

#### 4.7.1 Princip

Dart är i princip en modifierad Computermatic. Principen för Dart maskinen är att virket belastas med en konstant last och att utböjningen mäts. På grund av de svårigheter som finns då det gäller att hålla en konstant last har maskinen försetts med en lastcell som kontinuerligt mäter även lasten. Detta innebär att Dart mäter både last och utböjning, och att böjspänningen i virket är relativt konstant, Blake (1995). Spannet mellan upplagsrullarna är 914 mm (36"). Mätning av utböjning sker med en släpgivare med en noggrannhet på 0.1 mm.

För att kompensera för initialkrokighet hos virket har Dart en speciell mätarm, men till skillnad mot Computermatic sitter mätarmen på utmatningssidan. Detta kan vara en fördel då de vibrationer, eller svängningar, som uppstår då virket belastas inte i samma utsträckning kommer att påverka mätningen av initialkrokighet.



Figur 4.6 Principskiss av Dart.

#### 4.7.2 Hastighet

Dart finns i tre modeller där en är speciellt framtagen för sortering av Australiska lövträd. De andra två är för barrträd och skillnaden mellan de bägge är sorteringshastigheten. Model HV1 har variabel hastighet från 30 m/min upp till 250 m/min. Model LV1 levereras med en fast hastighet som kan väljas inom intervallet 80 till 150 m/min.

#### 4.7.3 Precision

Maskintillverkaren uppger en korrelation mellan hållfasthet och elasticitetsmodul uppmätt i maskinen mellan  $r^2 = 0.6 - 0.8$ , med en median  $r^2 = 0.7$ . Tillverkaren ger ingen upplysning om hastighet vid sortering eller om virket varit sågat eller hyvlat.

#### 4.7.4 Fördelar - nackdelar

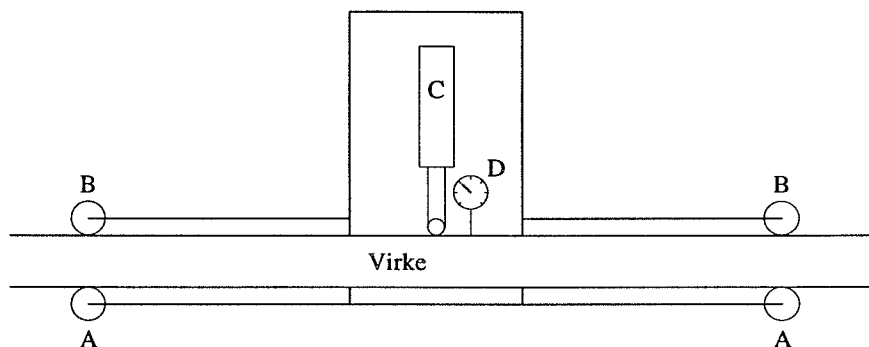
Priset för Model HV1 inklusive datainsamlingssystem och en trepunkts statisk elasticitetsmodulstestare är omkring 180.000 AU\$. Den enklare varianten, Model LV1, kostar omkring 135.000 AU\$.

### 4.8 TRU Timber Grader

#### 4.8.1 Princip

TRU Timber Grader är en mycket enkel böjande maskin med manuell matning, anonym (1971 och 1975). En stor fördel med maskinen är den kan produceras till en mycket låg kostnad. Handhavandet av maskinen är enligt följande:

- 1 Virkesstycket placeras mellan de fasta rullarna (A) och rullar med vikter (B) vilka skall rätta ut virket om det är krokigt, se Figur 4.7.
- 2 En last påförs pneumatiskt med cylinder (C) och virkets nedböjning mäts med en klocka (D).
- 3 Virkets styrka bestäms genom att gå in i ett diagram i vilket styrkan ges som funktion av nedböjningen.



Figur 4.7 Principen hos TRU Timber Grader.

Avståndet mellan upplagsrullarna är 914 mm för klenare dimensioner (< 50x152 mm) och 1219 mm för grövre dimensioner (>50x152 mm).

#### **4.8.2 Hastighet**

Sorteringen sker manuellt i TRU Timber Grader. Det är en statisk provning vilket innebär att operatören själv väljer de snitt som skall provas. Enligt tillverkaren kan sorteringen ske med en hastighet av 10 - 15 m/min.

#### **4.8.3 Fördelar - nackdelar**

En stor fördel med denna maskin är dess enkla konstruktion vilket innebär att priset kan hållas lågt.

Sorteringshastigheten är låg då matningen sker manuellt.

Maskinen kräver en operatör med goda kunskaper om virke då det är operatören som väljer det tvärsnitt som skall provas.

### **4.9 Finnograder**

#### **4.9.1 Princip**

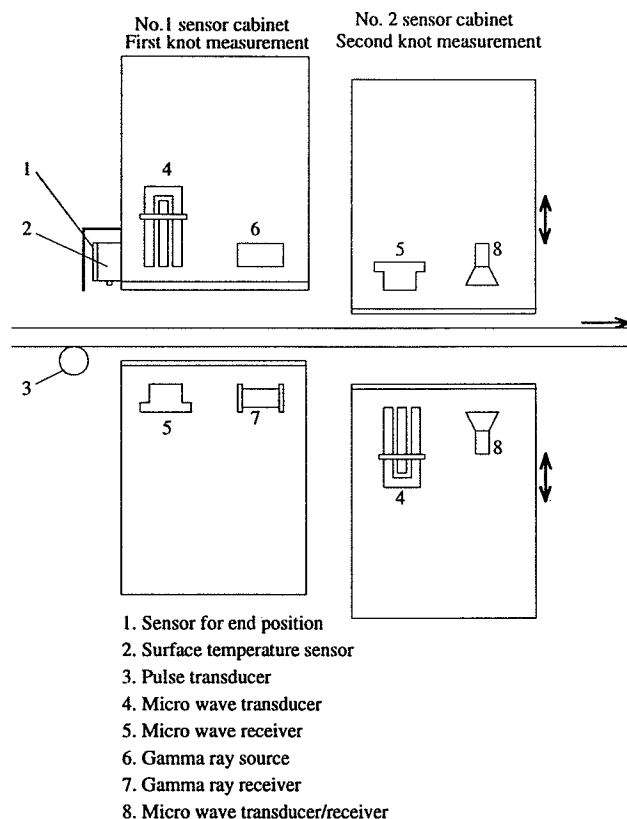
I Finnograder sker alla mätningar med hjälp av olika typer av strålning, vilket medger en kontaktfri mätning, anonym (1983). Maskinen mäter läge och storlek av kvistar, snedfibrighet och densitet. För att densiteten skall kunna bestämmas mäts även fuktkvot och temperatur hos virket.

Maskinen mäter varje 10 mm längs virkesstycket och medelvärdesbildar fem på varandra följande mätningar. Detta innebär att man får ett mätvärde varje 50 mm.

En stor fördel med Finnograder jämfört med de flesta böjande maskinerna (förutom EuroGreComat) är att hela virkesstycket sorteras.

Virkets densitet mäts genom absorption av röntgenstrålning. Denna mätning ger den totala massan av trä och vatten, och därför är det nödvändigt att mängden vatten (fuktkvoten) bestäms. Fuktkvotsmätningen görs med micro-vågor. Då dämpningen av micro-vågorna är beroende av vattnets temperatur måste även temperaturen mätas. Detta görs genom mätning av den infraröda strålningen från träts yta.

Snedfibrighet mäts med polariserade micro-vågor. Grunden till denna mätning är, att den dielektriska konstanten är större i fiberriktningen än vinkelrätt mot fibrerna. Två olika mätvärden presenteras. Det första visar snedfibrigheten hos kvistrent virke och detta värde tas från den punkt med den största dämpningen. Det andra värdet är ett filtrerat värde över 11 mätpunkter.



Figur 4.8 Principskiss av Finnograder.

Kvistmätningen baseras på ändringen i fashastighet hos micro-vågsstrålningen. Principen är att den dielektriska konstanten hos en kvist är större än för det omgivande träet. Totalt finns 15 detektorer längs virkets bredd (hur många som används beror på virkets bredd). Mätningen är vägd, med fallande vikt mot centrum, och summerade för båda sidorna av bredden.

Virkets böjhållfasthet beräknas från följande empiriska formel:

$$f_m = (C_1 + C_2 \cdot \rho + C_3 \cdot \rho^2 + C_4 \cdot \rho^3) \cdot e^{-f(\rho, KVS, KVD, SFG, SFK, u)} \quad (4.4)$$

där  $C_n$  är konstanter,  $\rho$  är densiteten, KVS är kvistsumman, KVD är skillnaden av kvistvärden mellan de två halvorna av, SFG är snedfibrigheten i kvistrena delar, SFK är snedfibrigheten vid kvist, och  $u$  är fuktkvoten.

#### 4.9.2 Hastighet

Sorteringshastigheten med Finnograder är upp till 300 m/min.

#### 4.9.3 Precision

Korrelationen mellan den av Finnograder beräknade hållfastheten och den statiska böjhållfastheten på högkant ligger normalt i området  $r^2 = 0.4 - 0.6$ . Denna korrelation gäller vid sortering i produktion.

#### 4.9.4 Fördelar - nackdelar

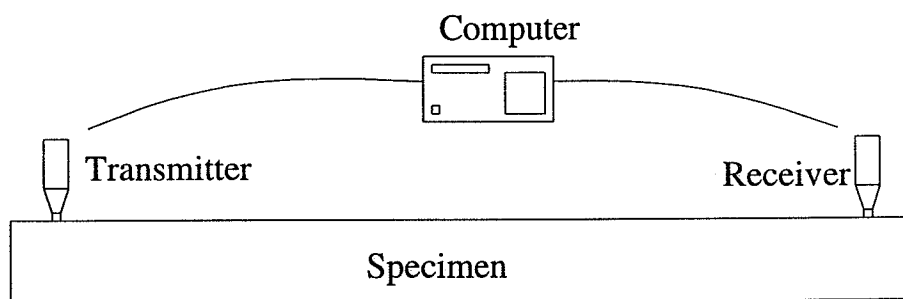
Finnograder finns i dagsläget inte till salu på den öppna marknaden. Patent och maskiner ägs av Limmareds Skogar AB.

Mäter hela virkesstycket.

### 4.10 Sylvatest

#### 4.10.1 Princip

Sylvatest är i sin nuvarande form ingen produktionsmaskin, utan mer ett fältinstrument. Utveckling pågår dock, och det finns prototyper för installation i linjer. Principen för Sylvatest är att mäta hastigheten hos en ultraljudspuls som går igenom virket. Denna hastighet är sedan korrelerad till virkets hållfasthet. Förutom mätning av pulsens hastighet mäts även virkets fuktkvot och temperatur.



Figur 4.9 Principskiss av Sylvatest.

Maskinproducenten har angivit följande relation mellan pulshastighet och hållfasthet för barrträd:

$$f_m = 0.039 \cdot c - 167 \quad (4.5)$$

där  $c$  är gångtiden hos en ultraljudpuls.

Vid användning av Sylvatest anges vilket träslag som skall analyseras, typ av tvärsnitt (rektangulärt eller cirkulärt) samt avstånd mellan sändare och mottagare. Instrumentet mäter sedan gångtiden för en puls, fuktkvoten och temperaturen. Sylvatest beräknar därefter vilken sorteringsklass virkesstycket hamnar i.

#### 4.10.2 Hastighet

Sylvatest är i sin nuvarande form ett fältinstrument och därför används det rent hantverksmässigt och sorteringshastigheten är mycket låg.

#### 4.10.3 Precision

Korrelationen mellan hastigheten hos en ultraljudpuls mätt med Sylvatest och den statiska

böjhållfastheten på högkant ligger normalt i området  $r^2 = 0.2 - 0.7$ . Korrelationen varierar kraftigt och en orsak kan vara applicering och placering av sändare och mottagare.

#### 4.10.4 Fördelar - nackdelar

Instrumentet i dess nuvarande utformning är ett fältinstrument vilket inte är avsett för sortering av virke, utan mer för kontroll av befintliga konstruktioner o dyl.

Instrumentet är billigt och lätt att använda. Det är känsligt för hur sändare och mottagare appliceras på virket. Det kan i vissa fall vara svårt att få tillräcklig kontakt mellan sändare/mottagare och virke.

Korrelationen mellan hållfasthet och ultraljudspulsens hastighet varierar kraftigt. Vissa undersökningar ger en mycket låg korrelation, enligt Boström (1994) är  $r^2 = 0.2 - 0.5$ , medan Perstorper (1994) har fått korrelation  $r^2 = 0.65$ .

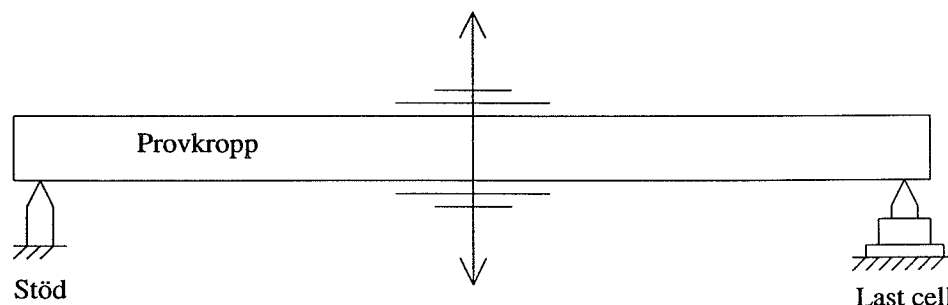
### 4.11 Metriguard Model 340 Transverse Vibration E-Computer

#### 4.11.1 Princip

Med Metriguard's E-Computer bestäms elasticitetsmodul, vikt, specifik vikt och dämpning. Principen är att virkesstycket läggs på två stöd, där det ena stödet innehåller en lastcell. Därefter initieras en vibration i provkroppen genom att för hand knacka till på kroppen mellan stöden. Lastcellen registrerar nu kroppens vikt, svängningsfrekvens samt dämpningen av vibrationerna. Elasticitetsmodulen kan från kroppens vikt och resonansfrekvensen beräknas ur följande samband:

$$E = \frac{W \cdot L^3 \cdot f^2}{K \cdot I} \quad (4.6)$$

där W är kroppens vikt  
L är avståndet mellan uplagen  
f är frekvensen  
K är en kalibreringskonstant  
I är tröghetsmomentet



Figur 4.10 Principen för Metriguard's E-Computer

#### **4.11.2 Hastighet**

E-Computer är en manuell utrustning varför det är svårt att bedöma sorteringshastigheten.

#### **4.11.3 Precision**

Enligt Metriguard (1994) är  $r^2 = 0.97$  mellan medelvärdet av elasticitetsmodulen längs ett virkesstycke uppmätt med CLT och elasticitetsmodulen mätt med E-Computer. Korrelationen mellan hållfasthet och elasticitetsmodulen uppmätt med E-Computer är inte känd.

#### **4.11.4 Fördelar - nackdelar**

E-Computer går att använda på många olika material, vilket innebär att även exempelvis stora limträbalkar kan provas.

Maskinen är relativt enkel varför priset kan hållas lågt i förhållande till sorteringsmaskiner med matning.

En nackdel är att E-Computer är manuell varför sorteringshastigheten blir låg.

### **4.12 Proof Testing**

Principen för "proof testing" är att virket belastas med en spänningsnivå motsvarande kravet för den aktuella hållfasthetsklassen. Detta innebär att virket utsätts för högre spänningar än vad som är fallet i de böjande sorteringsmaskinerna. Klarar virket belastningen, klarar det också kravet för den aktuella hållfasthetsklassen.

Ett problem med "proof testing" är, att det virke som ligger på gränsen men klarar provet kan bli delvis förstört. Virkets egenskaper kan ha förändrats och det är möjligt att exempelvis virkets långtidsegenskaper försämrats. Det finns även resultat som visar att virket inte påverkas av den höga belastningen, under förutsättning att den maximala lasten hålls under en viss tid, Solli och Lackner (1985).

Det finns en rad olika maskiner på marknaden för "proof testing". Bland annat har Metriguard åtta (8) olika typer för dragprovning och en maskin för böjprovning.

## 4.13 Sammanfattning

|                                   | Computer-matic                                                   | Tecmach Cook-Bolinder                 | EuroGre-Comat                                                                      | Raute Timgrader                                            | CLT och 7200 LS                                                                      | Dart                                                                       | TRU Timber Grader | Finnograder                                     | Sylvatest                       | E-Computer                     |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Antal maskiner                    | Sverige 31<br>Norge 5<br>Finland 3<br>UK, Irland 66<br>Övrigt 32 | Sverige 2<br>Norge 9<br>Övrigt 55     | Tyskland 5<br>Österrike 1                                                          | Sverige 1<br>Finland 18                                    | USA 32<br>Kanada 21<br>Australien 5<br>Nya Zeel. 1                                   |                                                                            | Sydafrika 125     | Sverige 1                                       |                                 |                                |
| Fysiska principer                 | Böjstyvhet, konstant last, mätarm för flatböj                    | Böjstyvhet, konstant deformation      | Böjstyvhet, röntgen, laser                                                         | Böjstyvhet, böjning i två riktningar, konstant deformation | Böjstyvhet, böjning i två riktningar, konstant deformation                           | Böjstyvhet, konstant last, mätarm för flatböj                              | Böjstyvhet        | Gammastrålning, micro-vågor, infraröd strålning | Hastighet hos en ultraljudspuls | Vibrationsmätning              |
| Sorterings-hastighet (m/min)      | 65 - 150                                                         | Upp till 200                          | 80 och 120                                                                         | 50 - 135                                                   | Upp till 600                                                                         | 30 - 250                                                                   | Manuell           | Upp till 300                                    | Manuell                         | Manuell                        |
| Virkes-dimensioner (mm)           | t = 25 - 75 mm                                                   | t = 34 - 75<br>b = 70 - 250           | t = 33 - 38<br>b = 135 - 220<br>under godkännande<br>t = 20 - 100<br>b = 100 - 320 | t = 25 - 75<br>b = 75 - 300                                | CLT:<br>t = 35 - 52<br>b = 63 - 290<br>Model 7200 LS:<br>t = 20 - 52<br>b = 50 - 300 | t = 25 - 50<br>b = 50 - 250                                                |                   | t = 25 - 75<br>b = 50 - 300                     |                                 |                                |
| Godkännande (ett urval av länder) | Sverige<br>Finland<br>Norge<br>England<br>Irland                 | Sverige<br>Norge<br>England           | Tyskland<br>Österrike                                                              | Sverige<br>Finland                                         | USA<br>Kanada<br>Australien<br>Nya Zeeland                                           | Australien<br>Nya Zeeland                                                  |                   | Sverige                                         |                                 |                                |
| Pris                              | £ 40000 -<br>£ 60000                                             | £ 34000 -<br>£ 80000                  | 0.6 milj DM<br>inkl in- och utmatning samt märkning                                | 0.5 milj FMK                                               | CLT:<br>0.185 milj<br>US\$<br>7200 LS:<br>0.110 milj<br>US\$                         | 0.18 milj<br>AU\$ inkl 3-punkts statisk MOE-test och datainsamlings-system |                   | Ej till försäljning för tillfället              |                                 |                                |
| Övrigt                            |                                                                  | Två körningar, alt krävs två maskiner | Mycket användarvänlig                                                              |                                                            |                                                                                      |                                                                            |                   |                                                 | Fältinstrument                  | Klarar olika typer av material |

#### 4.14 Referenser

- Anon. 1983: Approving tests of the Finnograder stress grading machine. Research Report No PUU3344, Technical Research Centre of Finland, Forest Products Laboratory
- Anon. 1971: New stress grading technique benefits timber users. TI - Technical information for industry, vol. 9, no. 9, Pretoria, South Africa
- Anon. 1975: TRU Timber Grader - Users' manual. CSIR Special Report Hout 95, Pretoria, South Africa
- Bechtel F. 1995: Personal communication.
- Blake P. 1995: Personal communication.
- Boström L. 1994a: Machine strength grading - the influence of moisture content. Meeting of IUFRO S5.02, Sydney, Australia
- Boström L. 1994b: Machine strength grading - comparison of four different systems. SP Report 1994:49
- Johansson C-J.; Claesson T. 1989: Hållfasthet och styvhet hos maskinsorterat virke - en studie av utfallet från fem sorteringsmaskiner. SP Rapport 1989:50
- Johansson C-J.; Brundin J.; Gruber R. 1992: Stress grading of Swedish and German timber - a comparison of machine stress grading and three visual grading systems. SP Report 1992:23
- Leicester R.H. 1994: Personal communication.
- Metriguard 1994: Precision testing equipment for wood. Catalog 21-2
- Palm K. 1995: Personal communication.
- Perstorper M. 1994: Strength and stiffness prediction of timber using conventional and dynamic methods. Proc. First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood, Sept 21-23, Sopron, Hungary
- Perstorper M.; Kliger R.; Johansson G. 1994: Large-size spruce timber - structural properties and grading methods. Proc. Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia
- Solli K.H.; Lackner R. 1985: Høykvalitet trevirke med små tverrsnitt. NTI-arbeidsrapport 43468

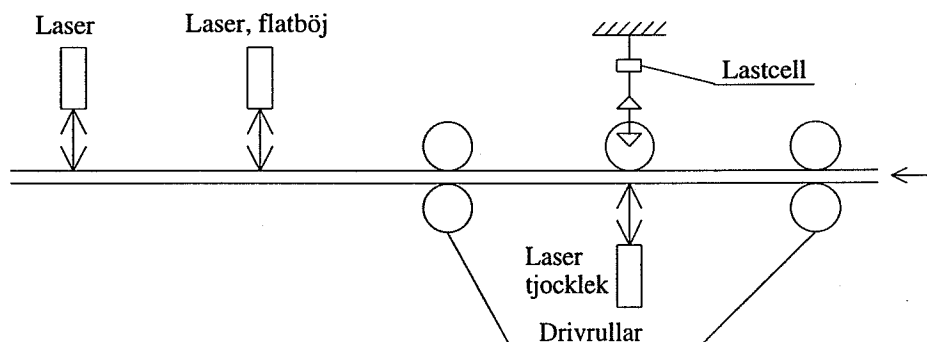
Solli K.H. 1993: Nordisk samkalibrering av styrkesorteringsmaskiner. NTI Prosjektrapport nr. 427058

## 5 Nya sorteringsmaskiner - prototyper

### 5.1 Ersson Stress Grader

Maskinen mäter böjstyvheten hos virket, Näslund (1992). Principen är, att kraften för att ge virket en viss bestämd utböjning mäts, dvs samma princip som hos Cook-Bolinder och EuroGreComat. Avståndet mellan upplagsrullarna är 900 mm, och belastningen sker mitt mellan upplagsrullarna. Maskinen är mycket kraftig, för att minska problemet med vibrationer som möjligen kan påverka mätningen. Vidare har maskinen drift på alla fyra rullarna, dvs även på upplagsrullarna. principen för maskinen framgår av Figur 5.1.

Två lasrar används för att mäta virkets initialkrokighet, och dessa sitter på maskinens utmatningssida. Dessutom finns en laser monterad i linje med den rulle som deformerar virket. Denna laser används för tjockleksmätning, samt för inställning av korrekt utböjning.



Figur 5.1 Principskiss av Ersson.

### 5.2 BAS

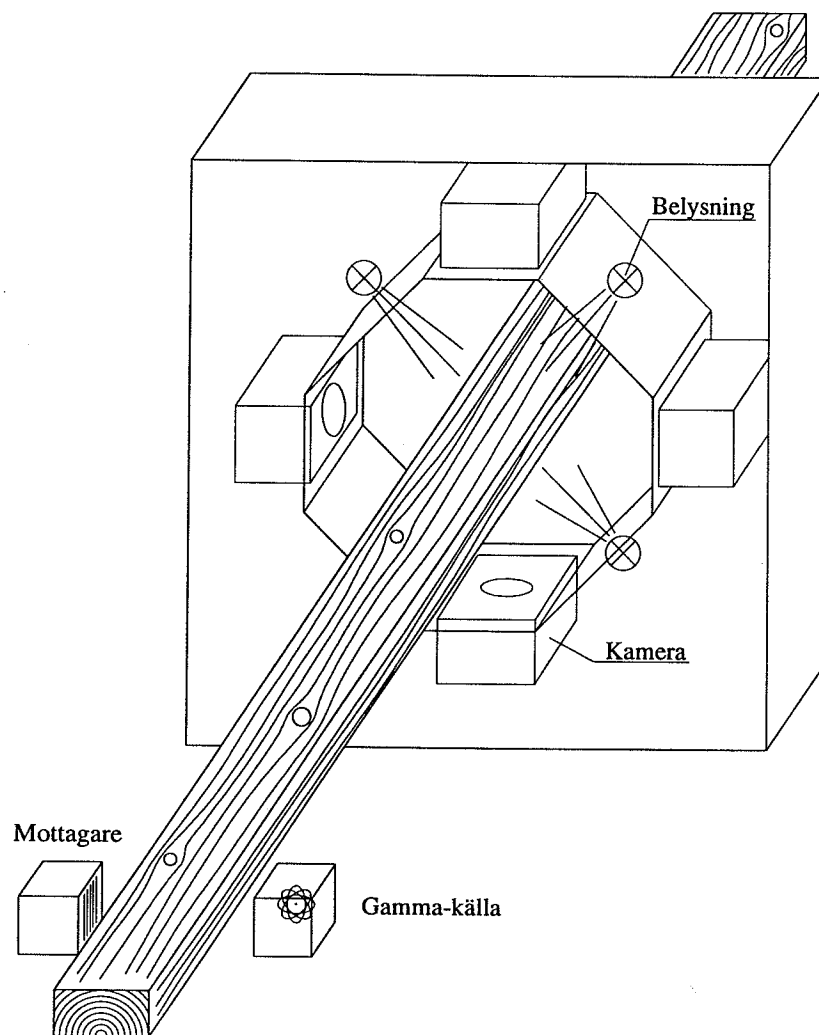
BAS (Beröringsfri Automatisk Sortering) består av två mätenheter och en analysenhet, Toverød (1994). Principen för denna maskin är att densitet och utseende (kvistar o dyl) mäts, se Figur 5.2, och avgör vilken sorteringsklass virket skall hamna i.

Enheten för densitetsmätning är uppbyggd av en strålningskälla (gammastrålning från isotopen Am 241), och en detektor. Virkets totala massa dämpar strålningen som går igenom virkesstycket och om virkets dimensioner är kända kan densiteten beräknas. Denna densitet är densiteten för virkesmassan plus det vatten som finns i virket. Det är därför viktigt att även mäta fuktkvoten hos virket. I den prototyp som idag finns har ingen fuktkvotsmätare kopplats direkt till systemet. Detta är givetvis möjligt. I enheten för densitetsmätning finns en processorenhet som behandlar signalerna från detektorn och sedan skickar det färdigbehandlade resultatet till analysenheten.

I den andra enheten finns fyra linjekameror med tillhörande belysningssystem. En linjekamera "fotograferar" endast en linje, och dessa linjer kan ha olika upplösning. I BAS-systemet används två olika kameror. De kameror som mäter virkets flatsida har en upplösning på 1024 bildpunkter per linje, och kamerorna på kantsidan har upplösningen 512 bildpunkter per linje.

Då virket passerar dessa kameror "fotograferas" virket med hög hastighet, 700 linjer per sekund. En bild av hela virkesstycket kan då skapas. Upplösningen på denna bild blir vid en hastighet av 120 m/min 3 mm i längsriktningen och 0.2 mm tvärs matningsriktningen. Alla data från kamerorna sänds till en beräkningsenhet som snabbt analyserar dessa data och tolkar bilderna. Från beräkningsenheten skickas sedan information om position, storlek och typ av defekter till analysenheten.

Analysenheten väger sedan samman resultaten från densitetsmätningen och utseendemätningen och som resultat fås vilken hållfasthet virket uppskattas ha. Prov vid NTI har visat att korrelationen mellan uppskattad hållfasthet med BAS och verklig hållfasthet är  $r^2 = 0.60$ .



Figur 5.2 Principskiss av BAS.

### 5.3 Micro-vågsteknik

Vid CSIRO, Australien, pågår utveckling av en prototyp som kan kopplas till en normal sorteringsmaskin av böjande typ, Leicester (1994). Denna prototyp består av två mätenheter där en mäter kvistar och den andra snedfibrighet. Principen framgår av Figur 5.3.

Vid användning av micro-vågor är valet av frekvens en balansgång mellan upplösning och störning. Ökas frekvensen kan mindre defekter detekteras, men störningar på elektronisk kringutrustning ökar också vilket medför problem vid mätningen. Utrustningen som utvecklas vid CSIRO arbetar med frekvensen 10 GHz vilket är en kompromiss mellan de höga frekvenser som är önskvärda för detektering av små defekter och de låga frekvenser som är önskvärda för att minska störningen på den elektroniska utrustningen. Med denna frekvens kan defekter med en storlek ned till 10 mm detekteras.



Figur 5.3 Principen för maskinkonfigurering.

Enheten för kvistmätning består av en sändare och, på motstående sida av virkesstycket, ett antal mottagare fixerade vid en polarisationsvinkel av  $\pm 45^\circ$  mot virkets riktning. Enheten för snedfibrighetsmätning består av en sändare och en mottagare monterade på varsin sida av virkesstycket. Till skillnad från enheten för kvistmätning används en så kallad Faraday rotator så sändaren och mottagaren sveps elektroniskt mellan vinklarna  $\pm 45^\circ$  och den vinkel vilken ger största dämpningen är också vinkeln för snedfibrigheten.

Sorteringshastigheten med denna utrustning skall kunna vara upp till 300 meter/minut och då sker kvistmätningen varje 6.5 mm, snedfibrighetsmätningen varje 11.0 mm och den mekaniska sorteringen varje 65.0 mm.

### 5.4 Ulvins styrkesorteringsmaskin

Principen för Ulvins styrkesorteringsmaskin är densamma som Computermatic, Solli (1995). Virket belastas med en konstant last och utböjningen registreras. Spännvidden mellan upplagsrullarna är 900 mm. På samma sätt som för Dart-maskinen mäts initialkrokigheten på utmatningssidan.

Styrning av maskinen sker med PLC-program. Detta innebär att alla inställningar sker från en kontrollpanel, och maskinen utför själv de mekaniska justeringarna.

Maskinen (prototypen) är byggd för hastigheten 150 m/min, och den är inställd för att klara utsortering av fem parallella klasser. Kapaciteten vad det gäller virkesdimensioner är tjocklek mellan 36-75 mm och bredd mellan 73-225 mm.

En fördel med denna maskin är att alla maskindelarna är standardvaror och därmed bör det inte vara några problem med reservdelar.

## **5.5 Referenser**

Leicester R.H.; Seath C.A.; Breiting H.O.; Shakiba S.B. 1994. Development of a commercial microwave stress-grader. Meeting of IUFRO S5.02, Sydney, Australia

Näslund A. 1992. Mätning och beräkning av virkeshållfastheten. Umeå universitet, Fysiska institutionen, rapport nr 9212

Toverød H. 1994. Berøringsfri automatisk sortering. Redogjørelse til NTIs generalforsamling 3 juni 1994

Solli K.H. 1995: Personal communication.

## 6 Konklusion

Den høje kvalitet af nordisk konstruktionstræ udnyttes idag i altfor ringe grad i byggeriet. Dette har bl.a. sin baggrund i en utilstrækkelig kvalitet af de anvendte styrkesorteringssystemer. Af typisk nordisk konstruktionstræ med en middelbøjningsstyrke på 45 MPa og en variationskoefficient på 25% burde der med et effektivt styrkesorteringssystem kunne produceres udfald af C24, C30 og C40 på henholdsvis 10-20%, 50-60% og 30-40%. Selv af nordisk konstruktionstræ af relativ ringe kvalitet med middelbøjningsstyrke på 35 MPa og en variationskoefficient på 30% burde der kunne produceres 30-40% af kvaliteten C30. Med den nuværende kvalitet af de visuelle og maskinelle systemer opnås i praksis langt lavere sorteringsudbytter, hvilket alvorligt svækker konkurrencekraften for træ som bygningsmateriale.

Som omtalt i markedsundersøgelsen, som også indgår i nærværende projekt, anvendes maskinsortering i stigende omfang i Norden. Alligevel vil visuel styrkesortering til stadighed have betydning især for de mindre virksomheder og især ved sortering af de lavere sorteringsklasser. Den visuelle styrkesortering har en række fordele og ulemper. Den er enkel at forstå, den kræver ingen store investeringer, og styrkesorteringsklassen kan altid senere kontrolleres. Til gengæld kan en visuel vurdering af træ hverken i tilstrækkelig grad tage hensyn til træs mikrostruktur og densitet eller kombinere sorteringskriterierne (f.eks. knaster og årringsbredde) optimalt. Forudsigelsen af styrken bliver derfor heller ikke optimal. Visuel styrkesortering er endvidere subjektiv og af den grund behæftet med stor målefejl. Heroverfor står maskinel styrkesortering, som en investeringsmæssigt betydelig dyrere, men samtidig objektiv og mere effektiv metode. Maskinsortering resulterer i betydeligt større udbytte specielt i de højere styrkeklasser, og metoden kan sortere til de højeste styrkeklasser, som er utilgængelige for visuel styrkesortering. Endvidere kan maskinel styrkesortering bedre end visuel sortering tilfredsstille kravet i EN338 om veldefinerede densitetssegenskaber hos det styrkesorterede træ. En ulempe ved det store flertal af de idag anvendte sorteringsmaskiner er, at de kræver *supplerende* visuel sortering.

### 6.1 Styrkesorteringsens baggrund

Kvaliteten af en styrkesortering er bestemt af:

- den grundlæggende (ideelle) sammenhæng mellem styrken og de valgte sorteringskriterier.
- den nøjagtighed hvormed de pågældende sorteringskriterier kan bestemmes ved den aktuelle (visuelle eller maskinelle) sorteringsmetode.
- Valget af maskinindstillinger eller værdier for de visuelle sorteringskriterier til adskillelse af de forskellige styrkesorteringsklasser

Kvaliteten af et styrkesorteringsprincip udtrykkes ved den såkaldte forklaringskoefficient,  $r^2$ , hvis værdi ligger mellem 0 og 1;  $r^2=0$  betyder, at styrken slet ikke kan forudsiges af den pågældende sorteringsparameter, mens  $r^2=1$  betyder, at styrken forudsiges med 100% nøjagtighed af den pågældende sorteringsparameter.  $r^2=0,60$  betyder eksempelvis, at 60% af variationen i styrkeparameteren er forklaret ved variationen i sorteringsparameteren.

Visuel styrkesortering vil under ideelle forhold kunne gennemføres med en forklaringskoefficient på maksimalt  $r^2=0,35-0,45$ . Dette resultat vil kunne opnås alene ved

bedømmelse af knaster og årringsbredde. At medtage kriterier som fiberhældning og reaktionsved vil normalt ikke forøge den visuelle styrkesorterings kvalitet. Det vil derimod resultere i forøget sorteringskvalitet ( $r^2=0,45-0,55$ ), såfremt densiteten bliver medtaget som kriterium. Dette peger på behovet for udvikling af et prisbilligt og letbetjent densitetsmåleinstrument, som kan anvendes som supplement til den normale visuelle sortering. Et sådant instrument ville tillige sikre ovenanførte overensstemmelse til EN338 m.h.t. veldefinerede densitetssegenskaber.

Ved en maskinel sortering kan udover de visuelle kriterier tillige anvendes stivhed og densitet. For disse opnås maksimalt forklaringskoefficienter af størrelsesorden henholdsvis  $r^2=0,55-0,70$  og  $r^2=0,20-0,35$ . Ved en kombination af to eller flere sorteringskriterier kan ved maskinel styrkesortering opnås en bestemmelse af bøjningsstyrken svarende til  $r^2=0,60-0,75$ . Forudsigelse af trækstyrken kan dog gøres en smule mere nøjagtigt ( $r^2=0,65-0,80$ ). Ligesom ved visuel styrkesortering giver anvendelse af mere end to sorteringskriterier ingen væsentlig kvalitetsforbedring.

For maskinel sortering er de to mest betydningsfulde kriterier stivhed og knaststørrelse. Stivheden er ubetinget den bedste enkeltparameter til styrkeforudsigelse. Effektiviteten af denne ene parameter er større end alle visuelle kriterier anvendt samtidigt. Visse resultaterne viser ligefrem, at kvaliteten af forudsigelsen ved benyttelse alene af stivheden ikke forbedres ved inkludering af yderligere kriterier. Normalt vil det dog betyde større udbytte også at inkludere knaststørrelse som sorteringskriterium. Knaststørrelsen målt på kantsiden giver ligeså god korrelation til bøjningsstyrke som knastarealforholdet gør. Det burde altså være tilstrækkeligt, at bestemme knasten på kantsiden, hvilket reducerer omkostningerne til udstyr.

Ovennævnte høje kvalitet i styrkeforudsigelsen (høj  $r^2$ -værdi) kræver, at maskinen måler de relevante sorteringskriterier med stor nøjagtighed. Normalt er der en betydelig spredning på maskiners måleresultater. Ved de almindeligt anvendte nedbøjningsmaskiner kan spredningen være forårsaget af faktorer som eksempelvis svingninger i bjælkerne under gennemkørslen og manglende mulighed for tykkelsesmåling. En maskines målenøjagtighed (variationskoefficienten) udtrykkes ved forholdet ( $V$ ) mellem standardafvigelsen (spredningen) for gentagne målinger af den samme størrelse og dennes middelværdi. Ved hjælp af en beregningsmodel udviklet til projektet vises det, at der som forventet opnås en forbedring af udfald eller karakteristisk styrke ved en forbedring af målenøjagtigheden. Det viser sig imidlertid også, at der ikke nås nogen væsentlig forbedring ved en reduktion af variationskoefficienten udover 0,1. Det kan følgelig kun betale sig at investere i reduktion af målefejl for maskiner, der arbejder med mindre nøjagtighed end svarende til  $V=0,1$ , og som samtidig ønskes anvendt til udsortering til en særlig høj styrkeklasse (f.eks. limtræ).

I praksis kan god visuel sortering påregnes gennemført med en forklaringskoefficient på maksimalt  $r^2=0,25$  mens maskinsortering kan forudsættes gennemført med en forklaringskoefficient på  $r^2=0,60$ . Tallene for  $r^2$  er, specielt for visuel sortering, i underkanten af, hvad der er nævnt i ovenfor. Årsagen er bl.a., at der i praksis sker en samtidig sortering af træ fra mange forskellige voksesteder (lokaliteter). Træ fra forskellige lokaliteter vil udvise forskellig afhængighed af de ikke-destruktive sorteringsparametre. For den enkelte lokalitet kan

der således udmærket findes en høj forklaringskoefficient, men anvendelse af én model for alle lokaliteter resulterer i en reduceret  $r^2$ -værdi. Dette forhold gør sig især gældende for årringsbredden, som anvendes ved visuel styrkesortering. Hertil kommer, at det i praksis ikke er muligt at udforme reglerne for visuel sortering på en måde som til fulde afspejler den indbyrdes afhængighed af knast- og årringskriterierne.

Kravet til en styrkesorteringsmaskines kvalitet er størst for de høje styrkeklasser. Ønskes alene en sortering til 2 lave klasser (C18, C24) er det ikke nødvendigt at anvende en maskine med høj præcision; der er ingen stor gevinst ved en forøgelse af forklaringskoefficienten udover ca.  $r^2=0,5$ . Ønskes derimod en opdeling i klasser, hvoraf én er en høj styrkeklasse (C30, C40) vil udfaldet i denne være direkte afhængig af forklaringskoefficientens størrelse.

Ovenstående betyder, at der til maskinsortering af konstruktionstræ er *behov for to maskintyper*. Én type vil anvende alle de væsentligste sorteringsprincipper i en højteknologisk, nøjagtig, hurtig og dermed dyr maskine. Denne vil finde anvendelse ved udsortering af træ af høj klasse til limtræ og andre ingeniørmæssigt krævende formål ( $\geq C30$ ) og ved sortering til alle sorteringsklasser på de største savværker, hvis gennemløb er stort nok til at retfærdiggøre den store investering. En anden maskintype vil nøjes med færre sorteringskriterier (f.eks. stivhed alene) målt med en mindre nøjagtighed og begrænset til moderat gennemløbshastighed. Sidstnævnte maskine vil finde anvendelse på mellemstore savværker, der alene ønsker at levere konstruktionstræ til de lavere styrkeklasser ( $\leq C30$ ).

Ovenstående konklusioner er baseret på en forudsætning om, at maskiners indstillingsværdier er valgt optimalt i forhold til de styrkeklasser, der sorteres til, eller at talværdierne i de visuelle sorteringsregler er valgt optimalt. I virkeligheden er dette imidlertid ikke tilfældet; både de visuelle og maskinelle kriterier er fastsat ud fra et begrænset antal forsøg med planker, der ikke nødvendigvis har været fuldt repræsentative for dagens markedssituation. For maskinel styrkesortering vil der dog være en mulighed for ved en kollektiv ændring af alle maskiners indstilling at korrigere sorteringen i overensstemmelse med eventuelle nye forskningsresultater. For visuel styrkesortering, derimod, er det betydelig vanskeligere at tage hensyn til sådanne eventuelle nye forskningsresultater, idet den resulterende ændring af reglerne kræver indlæring af nye rutiner hos et meget stort antal sorterere. Med erfaringer fra den nuværende situation i Norden må det konkluderes, at *der er stort behov både for en revision af de eksisterende maskinindstillinger og for en gennemgribende kalibrering af INSTA142. Sidstnævnte kalibrering er i særlig grad påkrævet for limtræklassernes styrkeværdier.*

## 6.2 Sorteringsprincipper

Hidtil har den mekaniske bøjning været dominerende som sorteringsprincip, og den vil utvivlsomt fortsat spille en central rolle, idet stivheden som tidligere nævnt er den bedste ikke destruktive parameter til forudsigelse af træs styrke. Der er imidlertid andre metoder, som idag anvendes i kombination med de bøjende maskiner, ligesom der er potentielle metoder, som endnu ikke har fundet praktisk anvendelse.

De vigtigste sorteringsprincipper er anført i tabel 6.1 sammen med de målte egenskaber. I tabel 6.2 er givet en konklusion vedrørende metodernes væsentligste fordele og ulemper.

**Tabel 6.1 Ikke destruktive metoder til bestemmelse af træs egenskaber**

| Metode                                | Egenskaber                                         |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Mekanisk bøjning                      | Elasticitetsmodul                                  |
| CCD-kamera                            | Synlige defekter som knaster                       |
| Nær-Infraødt Reflektion (NIR)         | Densitet, fugt, fiberhældning                      |
| Vibrationsmetoder, resonansfrekvenser | Elasticitetsmodul                                  |
| Røntgenstråling, gammastråling        | Densitet, knasters størrelse og placering          |
| Mikrobølger                           | Knasters størrelse og placering, fibervinkel, fugt |
| Stødbølger, ultralyd                  | Elasticitetsmodul                                  |
| Elektriske metoder                    | Fugt                                               |

**Tabel 6.2 Sorteringsprincippernes stærke og svage sider**

| Måling af stivhed                                                                        |                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fordele                                                                                  | Ulemper                                                                                  |
| Stivhed er det bedste sorteringskriterium                                                | Kræver supplerende sortering af plankes ender                                            |
| Stivhed er ofte den afgørende egenskab ved dimensionering af trækonstruktioner           | Planker belastes på "lavkant" men anvendes i praksis på "højkant"                        |
| Kendt og gennemprøvet teknologi med mulighed for fremstilling af maskiner i alle prislag | Vibration af planker ved hurtigt gennemløb kan forårsage stor nedsættelse af nøjagtighed |
| Mulighed for høj gennemløbshastighed                                                     | Vanskeligt at sortere planker med store tværsnit                                         |
| Kan anvendes til "proof -loading" med efterfølgende frasortering af de svageste planker  | Utilstrækkelig viden om korrekt indstilling af de eksisterende maskiner                  |
| Ingen arbejdsmiljømessige sikkerhedsproblemer                                            | Følsom for sortering af planker med vridning                                             |
| Kan sortere vådt træ                                                                     | Sorteringsklassen kan ikke kontrolleres visuelt                                          |
| Let at vedligeholde                                                                      | Fugtmåling og tykkelsesmåling nødvendig                                                  |
|                                                                                          | Behov for særskilt måling af plankers krumning                                           |
| CCD kamera                                                                               |                                                                                          |
| Fordele                                                                                  | Ulemper                                                                                  |
| Berøringsfri måling af knaster og revner                                                 | Kan næppe anvendes som eneste teknik                                                     |
| Kan anvende eksisterende visuelle regler for maksimale knaststørrelser                   | Relativ kostbar teknik, der bl.a. kræver stor computerkraft                              |
| Medtager plankens ender og kan måle krumninger                                           |                                                                                          |
| Kan kombinere styrkesortering med eventuelt behov for udseendesortering                  |                                                                                          |
| Sorteringsklassens knastkriterier kan kontrolleres visuelt                               |                                                                                          |
| Teknikken anvendes allerede idag ved udseendesortering af træ                            |                                                                                          |

Tabel 6.2 (fortsat)      Sorteringsprincippernes stærke og svage sider

| <b>Nær Infrarød Reflektion</b>                                                              |                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Fordele                                                                                     | Ulemper                                                                            |
| Berøringsfri måling af densitet og fugt                                                     | Kan ikke anvendes som eneste teknik                                                |
| Kan formentlig måle fiberhældning                                                           | Teknologi endnu ikke færdigudviklet                                                |
| Relativ billig instrumentering                                                              | Måler kun egenskaberne af overfladelag                                             |
| <b>Vibrationsmetoder</b>                                                                    |                                                                                    |
| Fordele                                                                                     | Ulemper                                                                            |
| God sammenhæng med det statiske elasticitetsmodul, som er bedste sorteringskriterium        | Der mangler dokumentation for den nøjagtige sammenhæng med bøjningsstyrke          |
| Kendt og gennemprøvet teknik                                                                | Sorteringsresultatet kan ikke kontrolleres visuelt                                 |
| Relativ billig instrumentering                                                              | Måler i sin enkleste udformning udelukkende den gennemsnitlige elasticitetsmodul   |
|                                                                                             | Yderligere teknisk udvikling nødvendig for at sikre acceptabel gennemløbshastighed |
|                                                                                             | Forudsætter supplerende måling af fugt og densitet                                 |
| <b>Røntgen- og gammastråling</b>                                                            |                                                                                    |
| Fordele                                                                                     | Ulemper                                                                            |
| Berøringsfri måling                                                                         | Sorteringsresultatet kan ikke kontrolleres visuelt                                 |
| Kan måle knaster, densitet og fiberhældning                                                 | Relativ dyr teknik                                                                 |
| Medtager plankens ender                                                                     | Arbejds miljøproblemer                                                             |
| Kendt og gennemprøvet teknologi                                                             | Bør formentlig kombineres med en stivhedsmåling                                    |
| Høj sorteringshastighed mulig                                                               | Kan ikke anvendes på vådt træ                                                      |
| Teknologi anvendes/udvikles indenfor andre grene af savværksindustrien (opskæring/aptering) |                                                                                    |
| <b>Mikrobølger</b>                                                                          |                                                                                    |
| Fordele                                                                                     | Ulemper                                                                            |
| Berøringsfri måling                                                                         | Sorteringsresultatet kan ikke kontrolleres visuelt                                 |
| Kan måle knaster, densitet, fiberhældning og fugt                                           | Kan ikke anvendes på vådt træ                                                      |
| Medtager plankens ender                                                                     | Bør formentlig kombineres med en stivhedsmåling                                    |
| Teknologi anvendes/udvikles indenfor andre grene af savværksindustrien (opskæring/aptering) | Arbejds miljøproblemer, men mindre end ved røntgen- og gammastråling               |
| Kendt og gennemprøvet teknologi                                                             |                                                                                    |
| Høj sorteringshastighed mulig                                                               |                                                                                    |
| Relativ billig teknik                                                                       |                                                                                    |

Tabel 6.2 (fortsat)      *Sorteringsprincippernes stærke og svage sider*

| Ultralyd                                                            |                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fordele                                                             | Ulemper                                                                                    |
| Anvendelse af lydhastighed alene er en kendt og gennemprøvet teknik | Vil skulle kombineres med andre teknikker for at opnå stor præcision                       |
| Meget billig teknik                                                 | Måler en gennemsnitsværdi over målelængden                                                 |
|                                                                     | Intim kobling til træet nødvendig                                                          |
|                                                                     | Lav gennemløbshastighed må påregnes                                                        |
|                                                                     | Eksisterende udstyr er manuelt og ikke tilpasset industriel produktion                     |
|                                                                     | Anvendelse af dæmpning og frekvensanalyse kræver yderligere forskningsmæssig dokumentation |

### 6.3 Styrkesorteringsmaskiner

De fleste af de styrkesorteringsmaskiner, som hidtil har været anvendt i Norden, er baseret på måling af konstruktionstræs stivhed. Sådanne maskiner måler bøjningsstivheden punktvis i plankernes længderetning, og estimerer herefter styrkeegenskaberne gennem kendte sammenhænge mellem stivhed og bøjningsstyrke (og evt. andre materialparametre). Metoden er relativ enkel og den har den store fordel at materialeegenskaben, stivhed, måles direkte. Disse maskiner har tillige en indbygget sikkerhed derved, at særligt svage planker vil blive ødelagt i maskinen (indirekte "proof-load grading"), da den påførte bøjningsspænding under sortering ligger omkring 13-15 MPa.

En stor ulempe ved denne direkte "fysiske afprøvning" er, at det er nødvendigt, at introducere relativt store kraftpåvirkninger, og at disse kræfter skal påføres meget hurtigt på grund af krav til stor gennemløbshastighed. Dette medfører vibrationer i plankerne, hvilket kan resultere i en alt for unøjagtig sortering. Sædvanligvis giver dette sig udslag i en konservativ sortering i den forstand, at plankerne nedklasses. For producenten er dette imidlertid en uholdbar situation, og meget af hensigten med maskinsortering forsvinder herved.

Teknologien, som benyttes i disse maskiner, blev udviklet for 20-30 år siden, og maskinerne har ikke helt fulgt med den tekniske udvikling. Selv om der er sket en vis opgradering, ventes idag på nye generationer af maskiner, som er tilpasset dagens teknologi og produktionsudstyr. Der kan for eksempel være tale om hurtigere databehandling på grund af moderne datateknologi, eller der kan være kommet mulighed for at registrere flere parametre samtidigt på grund af både ny teknologi og ny viden om konstruktionstræ og dets styrkeafhængige parametre.

I Tabel 6.3 er givet en oversigt over verdens 7 vigtigste styrkesorteringsmaskiner. Den såkaldte "Finnograder" er udeladt, da den ikke markedsføres. Endvidere er metoder som "Sylvatest" (ultralyd) og "E-computer" (resonanssvingninger) udeladt, da disse metoder ikke

er udviklet til brug i en produktionslinie. Alle de i tabellen anførte maskiner er baseret på måling af stivheden ved "fladsidebøjning" over en forholdsvis kort spændvidde (0,7-1,0 m), og kun en enkelt af maskinerne (EuroGreComat) inkluderer supplerende sorteringskriterier.

**Tabel 6.3**       *Oversigt over vigtigste, eksisterende styrkesorteringsmaskiner*

|                                          | Computer-matic                                                   | Tecmach (Cook-Bolinder)                        | EuroGre-Comat                                                                      | Raute Timgrader                                            | CLT och 7200 LS                                                                | Dart                                                                                     | TRU Timber Grader |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Antal maskiner</b>                    | Sverige 31<br>Norge 5<br>Finland 3<br>UK, Irland 66<br>Övrigt 32 | Sverige 2<br>Norge 9<br>Övrigt 55              | Tyskland 5<br>Österrike 1                                                          | Sverige 1<br>Finland 18                                    | USA 32<br>Kanada 21<br>Australien 5<br>Nya Zeel. 1                             | (Australien)<br>(N. Zeeland)                                                             | Sydafrika 125     |
| <b>Fysiske principer</b>                 | Bøjstyvhet, konstant last, måtarm för flatbøj                    | Bøjstyvhet, konstant deformation               | Bøjstyvhet, röntgen, laser                                                         | Bøjstyvhet, bøjning i två riktningar, konstant deformation | Bøjstyvhet, bøjning i två riktningar, konstant deformation                     | Bøjstyvhet, konstant last, måtarm för flatbøj                                            | Bøjstyvhet        |
| <b>Sorterings-hastighed (m/min)</b>      | 65 - 150                                                         | Upp till 200                                   | 80 och 120                                                                         | 50 - 135                                                   | Upp till 600                                                                   | 30 - 250                                                                                 | Manuell           |
| <b>Virkes-dimensioner (mm)</b>           | t = 25 - 75 mm                                                   | t = 34 - 75<br>b = 70 - 250                    | t = 33 - 38<br>b = 135 - 220<br>under godkännande<br>t = 20 - 100<br>b = 100 - 320 | t = 25 - 75<br>b = 75 - 300                                | CLT:<br>t = 35 - 52<br>b = 63 - 290<br>7200 LS:<br>t = 20 - 52<br>b = 50 - 300 | t = 25 - 50<br>b = 50 - 250                                                              |                   |
| <b>Godkännande (ett urval av länder)</b> | Sverige<br>Finland<br>Norge<br>England<br>Irland                 | Sverige<br>Norge<br>England                    | Tyskland<br>Österrike                                                              | Sverige<br>Finland                                         | USA<br>Kanada<br>Australien<br>Nya Zeeland                                     | Australien<br>Nya Zeeland                                                                |                   |
| <b>Pris</b>                              | £ 40000 -<br>£ 60000                                             | £ 34000 -<br>£ 80000                           | 0.6 milj DM<br>inkl in- och<br>utmatning<br>samt<br>märkning                       | 0.5 milj FMK                                               | CLT:<br>0.19 milj US\$<br>7200 LS:<br>0.11 milj US\$                           | 0.18 milj<br>AU\$ inkl 3-<br>punkts statisk<br>MOE-test och<br>datainsam-<br>lingssystem |                   |
| <b>Övrigt</b>                            |                                                                  | Två körnin-<br>gar, alt. krävs<br>två maskiner | Mycket<br>användar-<br>vänlig                                                      |                                                            |                                                                                |                                                                                          |                   |

Tre af de syv maskiner anvendes i Norden (Computermatic, Tecmac<sup>1</sup> og Raute Timgrader). Ved lav gennemløbshastighed kan alle tre maskiner forklare mere end 50% af styrkevariationerne (forklaringskoefficienten  $r^2 > 0,50$ ), og de vil under disse forhold give tilfredsstillende resultater ved sortering til de lave styrkeklasser. Ved høje gennemløbshastigheder forringes præstationerne signifikant.

<sup>1</sup> "Tecmac" maskinen kaldtes tidligere for "Cook-Bolinder"

Ved sortering til høje styrkeklasser ( $\geq C30$ ) til anvendelse f.eks. til limtrælameller er det for optimalt udbytte nødvendigt med mere nøjagtige maskiner. Forøget nøjagtighed kan opnås ved eliminering af vibrationer samt installation af instrumentering til måling af tykkelse, fugt og krumning. Nye stivhedsbaserede maskiner under udvikling (f.eks. Ersson Stress Grader) går denne vej. En forøget nøjagtighed kan tillige opnås ved at kombinere stivhedsmåling med en røntgenmåling af densitet og knastforekomst (EuroGreComat). Denne kombination er tidligere i denne rapport vist at være den optimale for maskinel styrkesortering, hvorfor det må forventes, at den nyudviklede EuroGreComat giver en meget effektiv sortering. Prisen er tilsvarende høj, idet en EuroGreComat koster mere end dobbelt så meget som en traditionel sorteringsmaskine.

CCD kamerateknik, som indebærer en optisk måling af knaster, har i mange år været anvendt til udseendesortering; denne teknik er nu også på vej ind i styrkesortering (BAS maskinen). I en kombination, hvor densitet måles samtidigt (gennemlysning eller NIR-teknik), burde en sådan maskine kunne give gode resultater. Maskinen kan billiggøres ved kun at måle knaster på plankernes smalside, idet gevinsten ved at inkludere bredsideknaster er ringe.

Markedsundersøgelsen, som omtales i denne rapports Del 1, afslørede behov også for maskiner i den billigere ende af skalaen. Dette behov vil formentlig kunne tilfredsstilles ved en stivhedsbaseret sorteringsmaskine. Her kan dog tillige metoder baseret på lyd/ultralyd og vibrationsteknik vise sig at have stort udviklingspotentiale. Sidstnævnte metoder gennemføres idag udelukkende ved brug af enkle, manuelle instrumenter, og metoderne er ikke udviklet til brug i en løbende produktion. En industriel udnyttelse af ultralydteknikken vil kræve udvikling af transducere, der er istand til hurtigt, effektivt og reproducerbart at etablere den nødvendige intime kontakt til træet. Endvidere vil der kræves supplerende måling af densitet. En industriel udnyttelse af vibrationsteknikken vil især kræve udvikling af et transport- og understøtningssystem som tillader frie svingninger og en industrivenlig metode til registrering af svingninger, hvor brug af laser lys muligvis kan være løsningen (berøringsfri).

Et særligt område for udvikling er behandling af de, ofte komplekse, signaler som kommer fra sorteringsmaskinerne. Der kan her være tale om eksempelvis matematiske metoder til forbedring af stivhedsbaserede maskiners præcision eller om anvendelse af neurale netværk til produktion af den optimale sammenhæng mellem på den ene side styrken og på den anden side samtlige målte sorteringsparametre.

## Indholdsfortegnelse for bilag.

**NB: Sidenummeringen starter forfra i bilag.**

### Bilag 1

|                                                                                        |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 1.0 Vandabsorption som funktion af tiden for diverse lette tilslagsmaterialer. . . . . | 1 |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---|

### Bilag 2

|                                          |   |
|------------------------------------------|---|
| 2.0 Beskrivelse af Roll-a-meter. . . . . | 2 |
|------------------------------------------|---|

### Bilag 3

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| 3.0 Blanderecepter. . . . . | 6 |
|-----------------------------|---|

### Bilag 4

|         |                                                                                                                                              |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.0     | VANDBEHOV SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENTINDHOLD, $c$ , FOR KONSTRUKTIONSBETON MED LIAPOR 5 SOM GROFT TILSLAG. . . . . | 10 |
| 4.1     | Statistisk analyse af resultaterne i tabel 5.1. . . . .                                                                                      | 11 |
| 4.1.1   | Vurdering af model 2: $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n}) + \beta_2 \cdot (c - \bar{c})$ er gældende. . . . .  | 11 |
| 4.1.1.1 | Opstilling af model 2. . . . .                                                                                                               | 11 |
| 4.1.1.2 | Hypotesetestninger på regressionsmodel 2. . . . .                                                                                            | 13 |
| 4.1.1.3 | Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængigt af cementindholdet. . . . .                                                        | 14 |
| 4.1.1.4 | Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængigt af volumenandel tilslag. . . . .                                                   | 14 |
| 4.1.2   | Konklusion. . . . .                                                                                                                          | 15 |
| 4.2     | 95% konfidensinterval for det gennemsnitlige vandbehov pr. $\text{m}^3$ beton. . . . .                                                       | 16 |

### Bilag 5

|         |                                                                                                                                              |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.0     | VANDBEHOV SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENTINDHOLD, $c$ , FOR KONSTRUKTIONSBETON MED LECA 4/8 SOM GROFT TILSLAG. . . . . | 17 |
| 5.1     | Statistisk analyse af resultaterne i tabel 5.2. . . . .                                                                                      | 18 |
| 5.1.1   | Vurdering af model 2: $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n}) + \beta_2 \cdot (c - \bar{c})$ er gældende. . . . .  | 18 |
| 5.1.1.1 | Opstilling af model 2. . . . .                                                                                                               | 18 |
| 5.1.1.2 | Hypotesetestninger på regressionsmodel 2. . . . .                                                                                            | 20 |
| 5.1.1.3 | Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængigt af cementindholdet. . . . .                                                        | 21 |
| 5.1.2   | Konklusion. . . . .                                                                                                                          | 22 |
| 5.2     | 95% konfidensinterval for det gennemsnitlige vandbehov pr. $\text{m}^3$ beton. . . . .                                                       | 22 |

## Indholdsfortegnelse for bilag fortsat

### Bilag 6

|         |                                                                                                                                          |    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.0     | VANDBEHOV SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENTINDHOLD, $c$ , FOR KONSTRUKTIONSBETON MED LECA T SOM GROFT TILSLAG. ....  | 24 |
| 6.1     | Statistisk analyse af resultaterne i tabel 5.3. ....                                                                                     | 25 |
| 6.1.1   | Vurdering af model 2: $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n}) + \beta_2 \cdot (c - \bar{c})$ er gældende. .... | 25 |
| 6.1.1.1 | Opstilling af model 2. ....                                                                                                              | 25 |
| 6.1.1.2 | Hypotesetestninger på regressionsmodel 2. ....                                                                                           | 27 |
| 6.1.1.3 | Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængig af cementindholdet. ....                                                        | 28 |
| 6.1.1.4 | Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængigt af volumenandel tilslag. ....                                                  | 28 |
| 6.1.2   | Konklusion. ....                                                                                                                         | 29 |
| 6.2     | 95% konfidensinterval for det gennemsnitlige vandbehov pr. $\text{m}^3$ beton. ....                                                      | 29 |

### Bilag 7

|         |                                                                                                                                                     |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.0     | UNDERSØGELSE AF GYLDIGHEDEN AF BOLOMEY'S LOV FOR LET KONSTRUKTION BETON MED LIAPOR 5 SOM GROFT TILSLAG. ....                                        | 31 |
| 7.1     | Statistisk analyse af resultaterne i tabel 6.1. ....                                                                                                | 31 |
| 7.1.1   | Vurdering af model 2: $Y_{\text{est. brudstyrke}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n}) + \beta_2 \cdot (c/v - \bar{c}/\bar{v})$ er gældende. .... | 32 |
| 7.1.1.1 | Opstilling af model 2. ....                                                                                                                         | 32 |
| 7.1.1.2 | Hypotesetestninger på regressionsmodel 2. ....                                                                                                      | 34 |
| 7.1.1.3 | Testning af om brudstyrken kan antages at være uafhængig af cement/vand- forholdet, $c/v$ . ....                                                    | 35 |
| 7.1.2   | Konklusion ....                                                                                                                                     | 35 |
| 7.2     | 95% konfidensinterval for estimeret brudstyrke som funktion af $n$ og $c/v$ . ....                                                                  | 36 |

### Bilag 8

|         |                                                                                                                                                    |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.0     | UNDERSØGELSE AF GYLDIGHEDEN AF BOLOMEYS LOV FOR EN BETON MED LECA 4/8 SOM GROFT TILSLAG. ....                                                      | 37 |
| 8.1     | Statistisk analyse af resultaterne i tabel 6.2. ....                                                                                               | 37 |
| 8.1.1   | Vurdering af model 2: $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n}) + \beta_2 \cdot (c/v - \bar{c}/\bar{v})$ er gældende. .... | 37 |
| 8.1.1.1 | Opstilling af model 2. ....                                                                                                                        | 37 |
| 8.1.1.2 | Hypotesetestninger på regressionsmodel 2. ....                                                                                                     | 40 |
| 8.1.1.3 | Testning af om brudstyrken kan antages at være uafhængig af cement/vand forholdet, $c/v$ . ....                                                    | 40 |
| 8.1.2   | Konklusion ....                                                                                                                                    | 41 |
| 8.2     | 95% konfidensinterval for estimeret brudstyrke som funktion af $n$ og $c/v$ . ....                                                                 | 41 |

## Indholdsfortegnelse for bilag fortsat

### Bilag 9

|         |                                                                                                                                                    |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 9.0     | UNDERSØGELSE AF GYLDIGHEDEN AF BOLOMEYS LOV FOR LET KONSTRUKTIONSBETON MED LECA T SOM GROFT TILSLAG. ....                                          | 43 |
| 9.1     | Statistisk analyse af resultaterne i tabel 6.3. ....                                                                                               | 43 |
| 9.1.1   | Vurdering af model 2: $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n}) + \beta_2 \cdot (c/v - \bar{c}/\bar{v})$ er gældende. .... | 43 |
| 9.1.1.1 | Opstilling af model 2. ....                                                                                                                        | 43 |
| 9.1.1.2 | Hypotesetestninger på regressionsmodel 2. ....                                                                                                     | 46 |
| 9.1.1.3 | Testning af om brudstyrken kan antages at være uafhængig af cement/vandindholdet. ....                                                             | 46 |
| 9.1.2   | Konklusion. ....                                                                                                                                   | 47 |
| 9.2     | 95% konfidensinterval for estimeret brudstyrke som funktion af n og c/v. ....                                                                      | 47 |

### Bilag 10

|      |                                                       |    |
|------|-------------------------------------------------------|----|
| 10.0 | Målte brudstyrker for de tre tilslagsmaterialer. .... | 49 |
|------|-------------------------------------------------------|----|

### Bilag 11

|      |                                                                |    |
|------|----------------------------------------------------------------|----|
| 11.0 | STATISTIKKEN I FORBINDELSE MED DOBBELT REGRESSIONSANALYSE. ... | 52 |
| 11.1 | Generelt ....                                                  | 52 |
| 11.2 | Beregninger. ....                                              | 52 |
| 11.3 | Testninger. ....                                               | 55 |
|      | Specialtilfældet $n=1$ : ....                                  | 56 |
| 11.4 | Konfidensintervaller. ....                                     | 56 |

### Bilag 12

|      |                                                                                               |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 12.0 | STATISTISK UNDERSØGELSE AF BRUDSTYRKERNES AFHÆNGIGHED AF TILSLAGETS FUGTINDHOLD. ....         | 58 |
| 12.1 | Generelt ....                                                                                 | 58 |
| 12.2 | Forudsætning ....                                                                             | 58 |
| 12.3 | Bartlett's test til undersøgelse af varianhomogenitet. ....                                   | 59 |
| 12.4 | Variansanalyse til test af tilslagsets fugtprocent indflydelse på betonernes brudstyrke. .... | 61 |
|      | 12.4.2 Testning. ....                                                                         | 61 |
|      | 12.4.3 Konklusion ....                                                                        | 61 |
| 12.5 | Konfidensintervaller for brudstyrken afhængigt af tilslagsets fugtprocent. ....               | 61 |

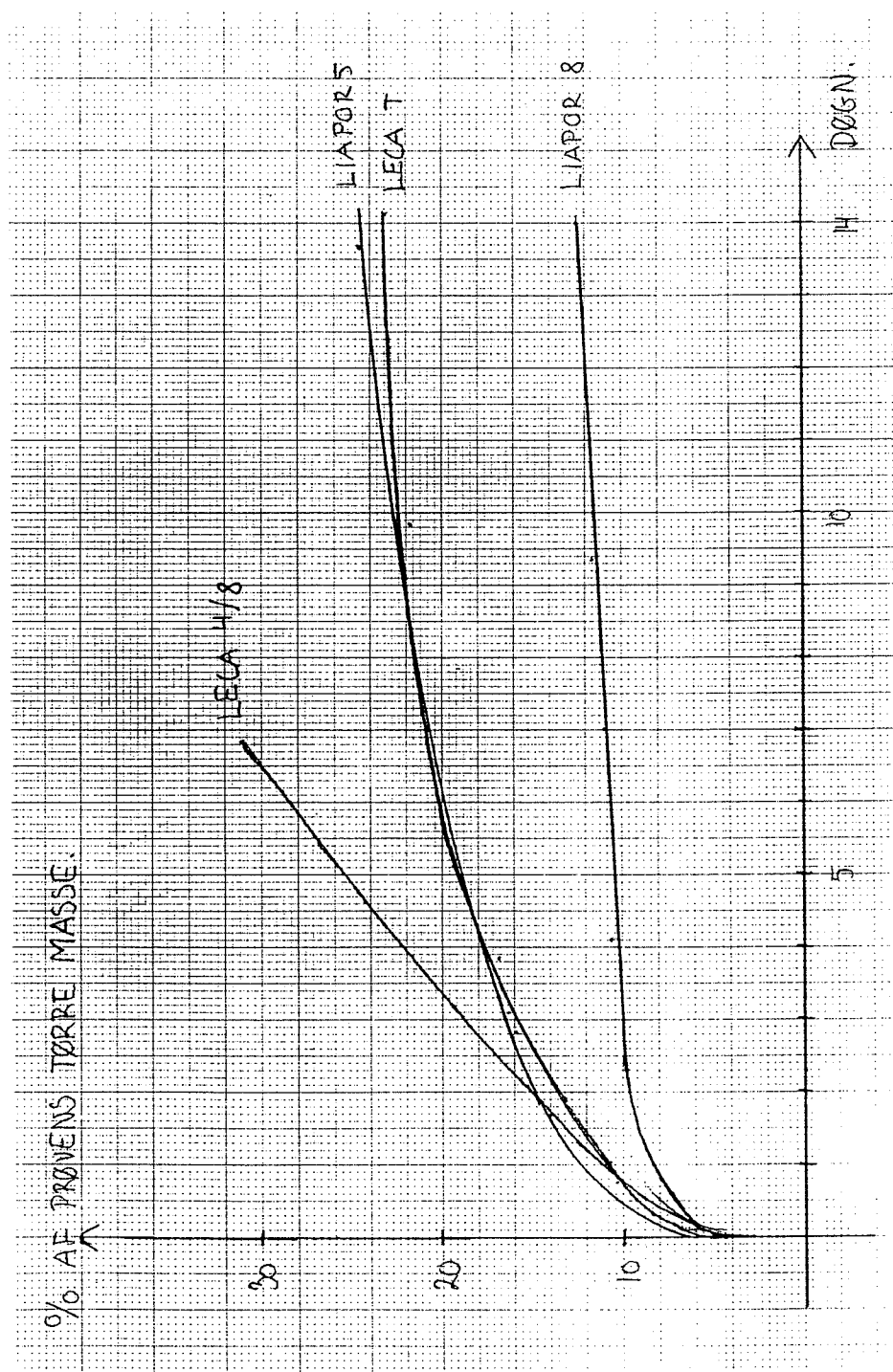
### Bilag 13

|      |                                                     |    |
|------|-----------------------------------------------------|----|
| 13.0 | STATISTIKKEN I FORBINDELSE MED BARTLETTS TEST. .... | 63 |
| 13.1 | Generelt ....                                       | 63 |
| 13.2 | Beregninger. ....                                   | 63 |
| 13.3 | Testninger ....                                     | 64 |

### Bilag 14

|      |                                                             |    |
|------|-------------------------------------------------------------|----|
| 14.0 | STATISTIKKEN I FORBINDELSE MED ENSIDET VARIANSANALYSE. .... | 65 |
| 14.1 | Generelt ....                                               | 65 |
| 14.2 | Beregninger. ....                                           | 65 |
| 14.3 | Testninger. ....                                            | 66 |
| 14.4 | Konfidensintervaller ....                                   | 66 |

1.0 Vandabsorption som funktion af tiden for diverse lette tilslagsmaterialer.



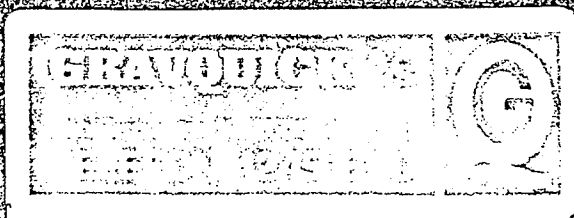
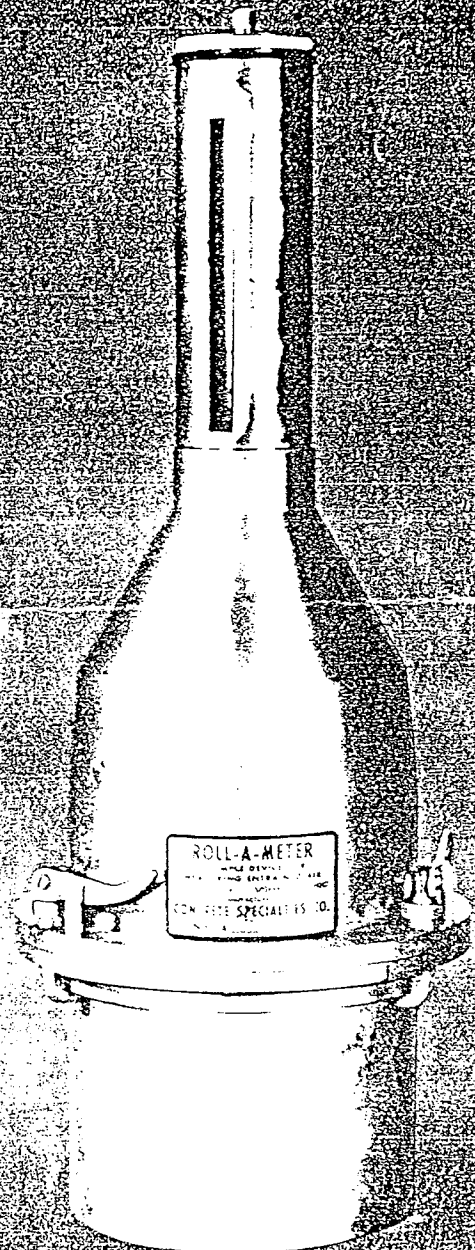
Figur 4.1 Vandabsorption som funktion af tiden for diverse lette tilslagsmaterialer.

# ROLL-A-METER

A Simple Device for Measuring Entrained Air

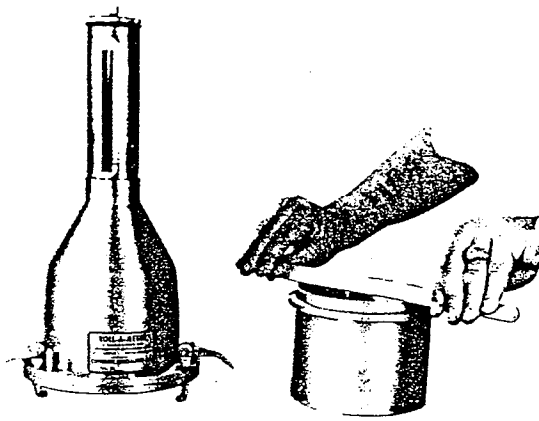
PRIS: 69 120000

- **ACCURATE**
- **RELIABLE**
- **EASY**
- **DURABLE**
- **RAPID**
- **LIGHTWEIGHT**
- **MEETS ASTM C-173-58**



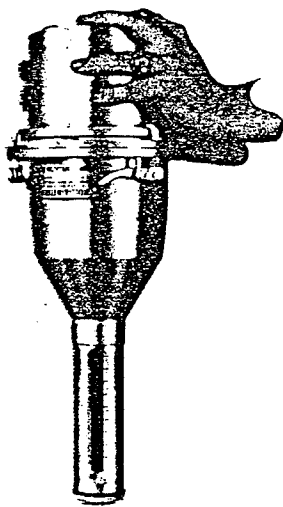
Ideal for Testing Lightweight Concrete  
No Special Training . . . No Computations

# OPERATION OF THE ROLL-A-METER



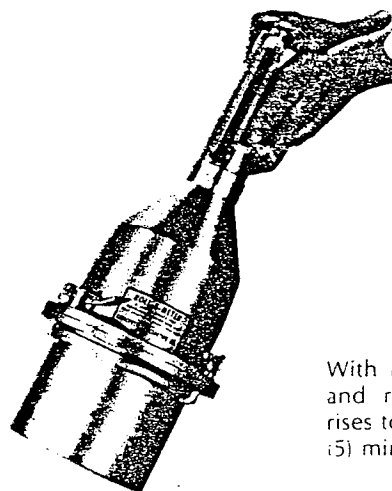
1

Fill the base with a sample of fresh concrete, placing it in the base by vibrating or tamping or in much the same manner as the concrete is to be placed on the job. Strike off the base, level full with the straight edge furnished. Wipe top edge clean.



4

Invert meter and agitate until concrete settles free from the base.



5

With neck elevated, rock and roll meter until air rises to the top (up to five (5) minutes.)

2  
Clamp top on, slowly fill meter with water ~~using baffle bottom funnel~~ so sample will not be disturbed and air released.

## IMPORTANT

Care should be taken to have approximately the same proportions of mortar and coarse aggregate as are used in the mix. Larger than 2-inch aggregate should be discarded and air determinations made on the balance.

After proper agitation, the air, accompanied by some foam, rises to the top. This should be allowed to stand, with occasional light agitation until the bubbles practically cease rising. This may take 3 to 5 minutes, although an immediate reading will tell whether there is any material excess or deficiency of air.

Following this, for closer results if desired, two general steps are possible:

### Method A

The foam may be dispelled by adding 23 ml. of IsoPropyl alcohol (rubbing alcohol) in a special brass cup provided with each meter. This 23 ml. is sufficient to reduce the air reading 1% (decreased air due to the added alcohol) will be the correct percentage of air in the test batch.

### Method B

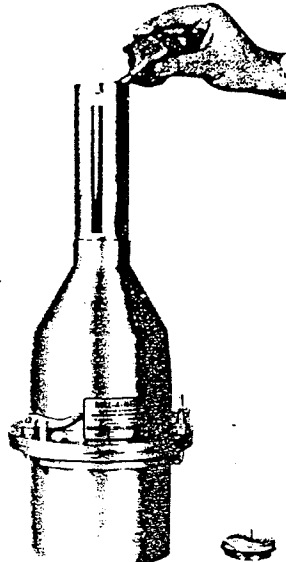
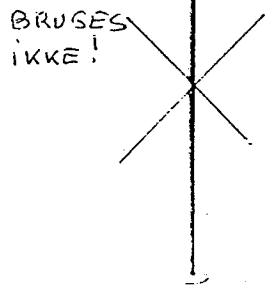
Numerous tests made by Method A indicate that usually the true reading should be 85 to 90 percent of the primary reading before defoaming. This is often sufficiently accurate for routine control purposes, but may be confirmed or modified by a few (A) tests. The water, the kind of air entraining agent used, as well as the brand of cement and the type of sand, gravel or admixture, may alter the above factor.

### VALUE OF AIR ENTRAINMENT

This is probably the greatest new development in concrete in this generation.

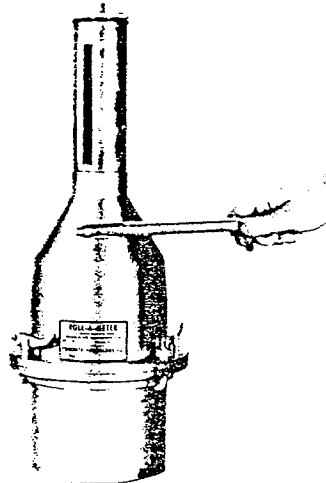
Tests indicate that correctly controlled air entrainment will increase the durability of concrete under severe exposure several hundred percent.

The careful control of the air to about 4% of the volume is considered ideal for average 1½" to 2" maximum concrete. Beyond this point the concrete strength is rapidly reduced.



3

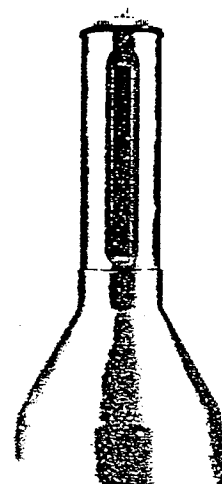
When water is up into the glass on meter neck, remove funnel and add water up to top, zero mark. Put on top cap.



6

Set meter upright and lightly jar until air has fully risen. Meter may be reagitated as a check on the result.

5 min.



7

Read percent of air on glass. If necessary, foam may be precipitated by adding 23 ml. of IsoPropyl alcohol with measuring cup provided.

Air entrainment increases the placability of concrete, and aids in preventing segregation. When air is entrained, the water may be reduced, which aids in giving the strength high. With air entrainment, coarser sand may be used or less of the regular sand, which again helps to lower the water and maintain high strengths. Sand may be increased in coarseness from .3 to .5 above normal Fineness Modulus when proper air entrainment is used. The troubles caused by premature stiffening of concrete may be materially decreased by the use of the ideal amount of air. Resistance to the deleterious action of sulphate waters may be increased with air entrainment. Many contractors are voluntarily using air entraining agents because of the great improvement in placability, prevention of bleeding, and reduction in segregation accompanying its use, even where the extra cost is not required.

#### WHERE IS AIR ENTRAINMENT DESIRABLE?

Any job where the concrete is to be exposed to weathering will benefit by the use of an air entraining agent. To avoid loss in strength due to too much air, which may be serious if over 5 or 6 percent, frequent routine tests of entrained air will be invaluable. No change of mix can be made without a resulting change in the percentage of air entrained with the same amount of air entraining agent being used. A prompt air meter measurement whenever a change occurs in temperature, slump, time of mixing, richness of mix, or proportion of sand to gravel, will usually reveal a corresponding change in air content which will call for modifying the amount of agent to be used.

## The Solution

The accuracy of Roll-A-Meter results is not dependent on the correctness of all these factors, but gives directly the percent air in the sample. It is unnecessary to know anything about the weight or physical characteristics of the ingredients supposed to be in the mix.

In contrast to other methods commonly used to determine the percentage of entrained air, this method is unaffected by changes in water-cement ratio, sand-cement ratio, sand-to-gravel ratios, inaccuracies of specific gravity determinations, and uncertainties as to absorbed or free water content of the aggregates used in the mix.

The use of the Roll-A-Meter has eliminated practically all of the above listed work, together with the arduous computations and uncertainties involved.

Even the extremely accurate measurement of the sample to be tested is not as important with this new meter, as the resulting error would be only about 1/20 as great in using the meter as the same error would be when using other methods or meters. Only a small percentage of the original error is involved in the Air-Meter result.

USED AS A PYCNOMETER, the Roll-A-Meter has been found to be excellent for other tests, such as determination of specific gravities of cement, sand, gravel and admixtures, and for quickly obtaining the percentage of free water in damp sand and gravel.

## Practical Control of Entrained Air

Held within well-established limits, air entrainment is highly beneficial in many ways. With ordinary highway or building construction using 1½" to 2" maximum aggregate, a maximum of about 4% air is usually desirable. Consequently, it is fundamentally important that an accurate method of determining the percentage of air be available. Having this, the amount of air entraining agent to be used, under any of the infinitely variable mix combinations and placing conditions can be quickly determined and effectively controlled.

### WHY THE UNIT WEIGHT OR GRAVIMETRIC METHOD IS UNSATISFACTORY

The Unit Weight method of determining the volume of entrained air is tedious and often impractical and unreliable. It involves technical manipulations and computations which can readily lead to serious errors.

## General Information

The accuracy of the Unit Weight method is dependent on extreme accuracy of several corollary technical determinations. Among these are:

- [1] Specific gravity of cement.
- [2] Specific gravity of sand and gravel.
- [3] Absorption of sand and gravel.
- [4] Average free moisture in sand and gravel.
- [5] There must also be accurate batching and accurate recording of all ingredients, including water, in the batch.
- [6] Thorough mixing of all ingredients.
- [7] Accurate measurement of the sample taken for an entrained air test.

How reliable is the Unit Weight method? It is possible for two well-qualified laboratory technicians to run parallel tests on all the above details and to come out with results differing materially in apparent entrained air.

Here is some convenient information in regard to the extreme accuracy required in determination of percent of air by other methods. Slightly incorrect factors may make errors as great or greater than listed below:

| An error of: | In          | Material =    | % Air Error |
|--------------|-------------|---------------|-------------|
| .03          | Spec. Grav. | Sand          | 3%          |
| .03          | Spec. Grav. | Gravel        | 7%          |
| .1           | Spec. Grav. | Cement        | 6%          |
| 2%           | Free Water  | Sand          | 5%          |
| 1%           | Free Water  | Gravel        | 5%          |
| 1%           | Absorption  | Sand & Gravel | 7%          |

Cement brands may differ .10 to .15 in specific gravity, or using kerosene instead of water for obtaining specific gravity of cement may cause .6%.

A sample taken from a poorly mixed batch may weigh as much as 3 lbs. per cubic foot more or less than average. This would lead to an error of 2% or so in apparent air entrainment.

Thus, accuracy by other meters or methods are dependent on:

- [1] Highly refined accuracy in determining all of the factors listed above.
- [2] On getting truly "average" representative samples of all materials used for making the above determinations.
- [3] On getting all materials uniformly mixed.
- [4] On getting a sample for air content test which has all the ingredients contained in the main batch, in practically the same proportions as the main batch.

Satisfactory accuracy of all of these operations is very difficult to obtain in the field.

## Specifications

Net Weight of Meter, less Accessories ..... 12.5 lb.  
Total Weight, including Accessories and Carton ..... 22.5 lb.  
Height ..... 11 1/2 in.  
Outside Diameter at Center ..... 11 1/2 in.  
Volume of Base ..... 1 1/2 cu. ft.

charles e.  
**watts**  
company

4121 - 6th N.W.  
Seattle, Washington 98107  
Telephone: [206] 783-8400

### 3.0 Blanderecepter.

På de næste tre sider vedlægges tre blandereceptoversigter over let konstruktionsbeton fremstillet med tilslagsmaterialerne Liapor 5, LECA 4/8 og LECA T.

Blanderecepten aflæses på følgende måde:

I hvide felter angives de blanderecepter, der er de oprindeligt beregnede blanderecepter, mens de gråtonede angiver de reelle prøveblandinger med angivelse af

- Observeret vandbehov.
- Sætmål (cm)
- Densitet af betonen efter endt blandeprocedure.
- Luft, volumen%, i beton
- Beregnet reelle volumenandel groft tilslag.

Blanderecepter er angivet pr. 25 l og pr. m<sup>3</sup>.

## Tilslagsstype: LIAPOR 5

Dimensioneringsgrundlag:

Est. vandmængde:

Dens. tør tilslag:

Dens. tør sand:

Dens. cement:

Fugt%, tilslag:

Luftvol%:

180 kg

885 kg/m<sup>3</sup>2610 kg/m<sup>3</sup>3150 kg/m<sup>3</sup>

0,13 %

1,5 %

| Vej | 0,35        |                                      |                                      | 0,45     |                   |                                      | 0,55     |                   |                                      | 0,65     |                   |                                      | 0,75     |                   |                                      |
|-----|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|-------------------|--------------------------------------|----------|-------------------|--------------------------------------|----------|-------------------|--------------------------------------|----------|-------------------|--------------------------------------|
|     | Pr. m       | Reel blanderecept pr. m <sup>3</sup> | Reel blanderecept pr. m <sup>3</sup> | Pr. 25 l | Reel blanderecept | Reel blanderecept pr. m <sup>3</sup> | Pr. 25 l | Reel blanderecept | Reel blanderecept pr. m <sup>3</sup> | Pr. 25 l | Reel blanderecept | Reel blanderecept pr. m <sup>3</sup> | Pr. 25 l | Reel blanderecept | Reel blanderecept pr. m <sup>3</sup> |
| 0,2 | Cement      | 514,29                               | 537,4                                | 400,00   | Cement            | 327,27                               | 336,8    | Cement            | 276,92                               | 289,7    | Cement            | 240,00                               | 240,00   | Cement            | 261,7                                |
|     | Tilslag     | 177,23                               | 185,1                                | 177,23   | Tilslag           | 177,23                               | 185,1    | Tilslag           | 177,23                               | 192,2    | Tilslag           | 177,23                               | 177,23   | Tilslag           | 193,3                                |
|     | Sand        | 1160,76                              | 1003,7                               | 1255,45  | Sand              | 1315,71                              | 1107,9   | Sand              | 1357,43                              | 1207,2   | Sand              | 1388,02                              | 1388,02  | Sand              | 1136,6                               |
|     | Vand        | 4,50                                 | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 |
|     | Sætnål (cm) | 5,0                                  | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  |
| 0,3 | Cement      | 12,86                                | 12,86                                | 10,00    | Cement            | 8,18                                 | 8,18     | Cement            | 6,92                                 | 6,92     | Cement            | 6,00                                 | 6,00     | Cement            | 6,00                                 |
|     | Tilslag     | 4,43                                 | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 |
|     | Sand        | 29,02                                | 24,02                                | 31,39    | Sand              | 32,89                                | 25,40    | Sand              | 33,94                                | 28,84    | Sand              | 34,70                                | 34,70    | Sand              | 27,20                                |
|     | Vand        | 4,50                                 | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 |
|     | Sætnål (cm) | 5,0                                  | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  |
| 0,4 | Cement      | 514,29                               | 494,8                                | 400,00   | Cement            | 327,27                               | 322,3    | Cement            | 276,92                               | 273,9    | Cement            | 240,00                               | 240,00   | Cement            | 240,22                               |
|     | Tilslag     | 177,23                               | 173,1                                | 177,23   | Tilslag           | 177,23                               | 173,1    | Tilslag           | 177,23                               | 173,1    | Tilslag           | 177,23                               | 177,23   | Tilslag           | 173,1                                |
|     | Sand        | 1160,76                              | 1003,7                               | 1255,45  | Sand              | 1315,71                              | 1107,9   | Sand              | 1357,43                              | 1207,2   | Sand              | 1388,02                              | 1388,02  | Sand              | 1136,6                               |
|     | Vand        | 4,50                                 | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 |
|     | Sætnål (cm) | 5,0                                  | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  |
| 0,5 | Cement      | 12,86                                | 12,86                                | 10,00    | Cement            | 8,18                                 | 8,18     | Cement            | 6,92                                 | 6,92     | Cement            | 6,00                                 | 6,00     | Cement            | 6,00                                 |
|     | Tilslag     | 4,43                                 | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 |
|     | Sand        | 29,02                                | 24,02                                | 31,39    | Sand              | 32,89                                | 25,40    | Sand              | 33,94                                | 28,84    | Sand              | 34,70                                | 34,70    | Sand              | 27,20                                |
|     | Vand        | 4,50                                 | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 |
|     | Sætnål (cm) | 5,0                                  | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  |
| 0,6 | Cement      | 514,29                               | 480,8                                | 400,00   | Cement            | 327,27                               | 305,9    | Cement            | 276,92                               | 265,9    | Cement            | 240,00                               | 240,00   | Cement            | 236,3                                |
|     | Tilslag     | 177,23                               | 173,1                                | 177,23   | Tilslag           | 177,23                               | 173,1    | Tilslag           | 177,23                               | 173,1    | Tilslag           | 177,23                               | 177,23   | Tilslag           | 173,1                                |
|     | Sand        | 1160,76                              | 1003,7                               | 1255,45  | Sand              | 1315,71                              | 1107,9   | Sand              | 1357,43                              | 1207,2   | Sand              | 1388,02                              | 1388,02  | Sand              | 1136,6                               |
|     | Vand        | 4,50                                 | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 |
|     | Sætnål (cm) | 5,0                                  | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  |
| 0,7 | Cement      | 12,86                                | 12,86                                | 10,00    | Cement            | 8,18                                 | 8,18     | Cement            | 6,92                                 | 6,92     | Cement            | 6,00                                 | 6,00     | Cement            | 6,00                                 |
|     | Tilslag     | 4,43                                 | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 |
|     | Sand        | 29,02                                | 24,02                                | 31,39    | Sand              | 32,89                                | 25,40    | Sand              | 33,94                                | 28,84    | Sand              | 34,70                                | 34,70    | Sand              | 27,20                                |
|     | Vand        | 4,50                                 | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 |
|     | Sætnål (cm) | 5,0                                  | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  |
| 0,8 | Cement      | 514,29                               | 480,8                                | 400,00   | Cement            | 327,27                               | 305,9    | Cement            | 276,92                               | 265,9    | Cement            | 240,00                               | 240,00   | Cement            | 236,3                                |
|     | Tilslag     | 177,23                               | 173,1                                | 177,23   | Tilslag           | 177,23                               | 173,1    | Tilslag           | 177,23                               | 173,1    | Tilslag           | 177,23                               | 177,23   | Tilslag           | 173,1                                |
|     | Sand        | 1160,76                              | 1003,7                               | 1255,45  | Sand              | 1315,71                              | 1107,9   | Sand              | 1357,43                              | 1207,2   | Sand              | 1388,02                              | 1388,02  | Sand              | 1136,6                               |
|     | Vand        | 4,50                                 | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 |
|     | Sætnål (cm) | 5,0                                  | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  |
| 0,9 | Cement      | 12,86                                | 12,86                                | 10,00    | Cement            | 8,18                                 | 8,18     | Cement            | 6,92                                 | 6,92     | Cement            | 6,00                                 | 6,00     | Cement            | 6,00                                 |
|     | Tilslag     | 4,43                                 | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 | 4,43     | Tilslag           | 4,43                                 |
|     | Sand        | 29,02                                | 24,02                                | 31,39    | Sand              | 32,89                                | 25,40    | Sand              | 33,94                                | 28,84    | Sand              | 34,70                                | 34,70    | Sand              | 27,20                                |
|     | Vand        | 4,50                                 | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 |
|     | Sætnål (cm) | 5,0                                  | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  |
| 1,0 | Cement      | 514,29                               | 480,8                                | 400,00   | Cement            | 327,27                               | 305,9    | Cement            | 276,92                               | 265,9    | Cement            | 240,00                               | 240,00   | Cement            | 236,3                                |
|     | Tilslag     | 177,23                               | 173,1                                | 177,23   | Tilslag           | 177,23                               | 173,1    | Tilslag           | 177,23                               | 173,1    | Tilslag           | 177,23                               | 177,23   | Tilslag           | 173,1                                |
|     | Sand        | 1160,76                              | 1003,7                               | 1255,45  | Sand              | 1315,71                              | 1107,9   | Sand              | 1357,43                              | 1207,2   | Sand              | 1388,02                              | 1388,02  | Sand              | 1136,6                               |
|     | Vand        | 4,50                                 | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 | 4,50     | Vand              | 4,50                                 |
|     | Sætnål (cm) | 5,0                                  | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  | 5,0      | Sætnål (cm)       | 5,0                                  |

## Tilslagstype: LECA 4/8

Proportionseringsgrundlag:

Est. vandmængde:

Dens. tør tilslag:

Dens. tør sand:

Dens. cement:

Fug%, tilslag:

Luftvol%:

180 kg

456 kg/m<sup>3</sup>2610 kg/m<sup>3</sup>3150 kg/m<sup>3</sup>

0,27 %

1,5 %

| 4/4         | 0,35        | 0,45        | 0,55        | 0,65        | 0,75        | 0,85        | 0,95        | 1,05        |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Pr. m       | Pr. m       | Pr. m       | Pr. m       | Pr. m       | Pr. m       | Pr. m       | Pr. m       | Pr. m       |
| Cement      | Cement      | Cement      | Cement      | Cement      | Cement      | Cement      | Cement      | Cement      |
| Tilslag     | Tilslag     | Tilslag     | Tilslag     | Tilslag     | Tilslag     | Tilslag     | Tilslag     | Tilslag     |
| Sand        | Sand        | Sand        | Sand        | Sand        | Sand        | Sand        | Sand        | Sand        |
| 0,2         | 0,2         | 0,2         | 0,2         | 0,2         | 0,2         | 0,2         | 0,2         | 0,2         |
| Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    |
| 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       |
| 2,29        | 2,29        | 2,29        | 2,29        | 2,29        | 2,29        | 2,29        | 2,29        | 2,29        |
| 29,02       | 29,02       | 29,02       | 29,02       | 29,02       | 29,02       | 29,02       | 29,02       | 29,02       |
| 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        |
| Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) |
| 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         |
| Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) |
| 1905,0      | 1905,0      | 1905,0      | 1905,0      | 1905,0      | 1905,0      | 1905,0      | 1905,0      | 1905,0      |
| Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    |
| 0,212       | 0,212       | 0,212       | 0,212       | 0,212       | 0,212       | 0,212       | 0,212       | 0,212       |
| n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    |
| 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       |
| 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,3         |
| Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    |
| 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       |
| 3,43        | 3,43        | 3,43        | 3,43        | 3,43        | 3,43        | 3,43        | 3,43        | 3,43        |
| 22,59       | 22,59       | 22,59       | 22,59       | 22,59       | 22,59       | 22,59       | 22,59       | 22,59       |
| 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        |
| Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) |
| 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         | 6,0         |
| Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) |
| 1887,5      | 1887,5      | 1887,5      | 1887,5      | 1887,5      | 1887,5      | 1887,5      | 1887,5      | 1887,5      |
| Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    |
| 0,294       | 0,294       | 0,294       | 0,294       | 0,294       | 0,294       | 0,294       | 0,294       | 0,294       |
| n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    |
| 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       |
| 0,4         | 0,4         | 0,4         | 0,4         | 0,4         | 0,4         | 0,4         | 0,4         | 0,4         |
| Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    | Pr. 25 l    |
| 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       | 12,86       |
| 4,57        | 4,57        | 4,57        | 4,57        | 4,57        | 4,57        | 4,57        | 4,57        | 4,57        |
| 16,16       | 16,16       | 16,16       | 16,16       | 16,16       | 16,16       | 16,16       | 16,16       | 16,16       |
| 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        | 4,50        |
| Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) | Sætnål (cm) |
| 7,0         | 7,0         | 7,0         | 7,0         | 7,0         | 7,0         | 7,0         | 7,0         | 7,0         |
| Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) | Dens (kg/m) |
| 1613,0      | 1613,0      | 1613,0      | 1613,0      | 1613,0      | 1613,0      | 1613,0      | 1613,0      | 1613,0      |
| Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    | Luftvol%    |
| 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       | 0,372       |
| n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    | n reel =    |
| 0,378       | 0,378       | 0,378       | 0,378       | 0,378       | 0,378       | 0,378       | 0,378       | 0,378       |

## Tilslagsmateriale: LECA T

Proportioneringsgrundlag

Est. vandmængde:

Dens. tør tilslag:

Dens. tør sand:

3150 kg/m<sup>3</sup>

0,21 %

1,5 %

Dens. cement:

Fug%, tilslag:

Luftvol%:

180 kg

573 kg/m<sup>3</sup>2610 kg/m<sup>3</sup>

| Beton | Pr. m    | 0,35    |         |         |         | 0,35     |                  |                                     |                            | 0,35                 |         |         |         | 0,35    |          |                  |                                     | 0,35                       |                      |         |         |         |         |          |                  |                                     |                            |
|-------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|----------|------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|----------|------------------|-------------------------------------|----------------------------|
|       |          | Cement  | Tilslag | Sand    | Vand    | Pr. 25 l | Reel blandercept | Reel blandercept pr. m <sup>3</sup> | Dens. (kg/m <sup>3</sup> ) | Luftvol%<br>n reel = | Cement  | Tilslag | Sand    | Vand    | Pr. 25 l | Reel blandercept | Reel blandercept pr. m <sup>3</sup> | Dens. (kg/m <sup>3</sup> ) | Luftvol%<br>n reel = | Cement  | Tilslag | Sand    | Vand    | Pr. 25 l | Reel blandercept | Reel blandercept pr. m <sup>3</sup> | Dens. (kg/m <sup>3</sup> ) |
| 0,2   | Cemen    | 514,29  | 345,1   | 400,00  | 1160,76 | 12,86    | 12,86            | 10,00                               | 187,6                      | 327,27               | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27   | 327,27           | 327,27                              | 327,27                     | 327,27               | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27   | 327,27           | 327,27                              | 327,27                     |
|       | Tilslag  | 121,7   | 121,7   | 114,84  | 1160,76 | 2,87     | 2,87             | 10,00                               | 187,6                      | 8,18                 | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18     | 8,18             | 8,18                                | 8,18                       | 8,18                 | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18     | 8,18             | 8,18                                |                            |
|       | Sand     | 1160,76 | 1018,1  | 1255,45 | 1160,76 | 31,39    | 31,39            | 10,00                               | 187,6                      | 1315,71              | 1315,71 | 1315,71 | 1315,71 | 1315,71 | 1315,71  | 1315,71          | 1315,71                             | 1315,71                    | 1315,71              | 1315,71 | 1315,71 | 1315,71 | 1315,71 | 1315,71  | 1315,71          | 1315,71                             |                            |
|       | Vand     | 1160,76 | 190,7   | 1255,45 | 1160,76 | 4,50     | 4,50             | 10,00                               | 187,6                      | 4,50                 | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50     | 4,50             | 4,50                                | 4,50                       | 4,50                 | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50     | 4,50             | 4,50                                |                            |
|       | Pr. 25 l | 12,86   | 12,86   | 10,00   | 190,7   | 10,00    | 10,00            | 10,00                               | 187,6                      | 8,18                 | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18     | 8,18             | 8,18                                | 8,18                       | 8,18                 | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18     | 8,18             | 8,18                                |                            |
| 0,3   | Cemen    | 514,29  | 301,8   | 400,00  | 1160,76 | 12,86    | 12,86            | 10,00                               | 176,9                      | 327,27               | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27   | 327,27           | 327,27                              | 327,27                     | 327,27               | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27   | 327,27           | 327,27                              |                            |
|       | Tilslag  | 172,26  | 168,2   | 172,26  | 1160,76 | 4,31     | 4,31             | 10,00                               | 176,9                      | 172,26               | 172,26  | 172,26  | 172,26  | 172,26  | 172,26   | 172,26           | 172,26                              | 172,26                     | 172,26               | 172,26  | 172,26  | 172,26  | 172,26  | 172,26   | 172,26           | 172,26                              |                            |
|       | Sand     | 903,67  | 881,5   | 998,37  | 1160,76 | 22,59    | 22,59            | 10,00                               | 176,9                      | 1058,63              | 1058,63 | 1058,63 | 1058,63 | 1058,63 | 1058,63  | 1058,63          | 1058,63                             | 1058,63                    | 1058,63              | 1058,63 | 1058,63 | 1058,63 | 1058,63 | 1058,63  | 1058,63          | 1058,63                             |                            |
|       | Vand     | 903,67  | 175,6   | 998,37  | 1160,76 | 4,50     | 4,50             | 10,00                               | 176,9                      | 4,50                 | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50     | 4,50             | 4,50                                | 4,50                       | 4,50                 | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50     | 4,50             | 4,50                                |                            |
|       | Pr. 25 l | 12,86   | 12,86   | 10,00   | 175,6   | 10,00    | 10,00            | 10,00                               | 176,9                      | 8,18                 | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18     | 8,18             | 8,18                                | 8,18                       | 8,18                 | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18     | 8,18             | 8,18                                |                            |
| 0,4   | Cemen    | 514,29  | 287,2   | 400,00  | 1160,76 | 12,86    | 12,86            | 10,00                               | 169,2                      | 327,27               | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27   | 327,27           | 327,27                              | 327,27                     | 327,27               | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27  | 327,27   | 327,27           | 327,27                              |                            |
|       | Tilslag  | 229,68  | 217,5   | 229,68  | 1160,76 | 5,74     | 5,74             | 10,00                               | 169,2                      | 229,68               | 229,68  | 229,68  | 229,68  | 229,68  | 229,68   | 229,68           | 229,68                              | 229,68                     | 229,68               | 229,68  | 229,68  | 229,68  | 229,68  | 229,68   | 229,68           | 229,68                              |                            |
|       | Sand     | 646,59  | 707,0   | 741,28  | 1160,76 | 18,53    | 18,53            | 10,00                               | 169,2                      | 801,54               | 801,54  | 801,54  | 801,54  | 801,54  | 801,54   | 801,54           | 801,54                              | 801,54                     | 801,54               | 801,54  | 801,54  | 801,54  | 801,54  | 801,54   | 801,54           | 801,54                              |                            |
|       | Vand     | 646,59  | 170,5   | 741,28  | 1160,76 | 4,50     | 4,50             | 10,00                               | 169,2                      | 4,50                 | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50     | 4,50             | 4,50                                | 4,50                       | 4,50                 | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50    | 4,50     | 4,50             | 4,50                                |                            |
|       | Pr. 25 l | 12,86   | 12,86   | 10,00   | 170,5   | 10,00    | 10,00            | 10,00                               | 169,2                      | 8,18                 | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18     | 8,18             | 8,18                                | 8,18                       | 8,18                 | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18    | 8,18     | 8,18             | 8,18                                |                            |

## Bilag 4

### ANALYSE AF VANDBEHOV FOR LET KONSTRUKTIONSBETON SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENTINDHOLD, $c$ , TIL VURDERING AF GYLDIGHEDEN AF LYES LOV.

#### 4.0 VANDBEHOV SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENTINDHOLD, $c$ , FOR KONSTRUKTIONSBETON MED LIAPOR 5 SOM GROFT TILSLAG.

På grundlag af resultaterne fra de gennemførte prøveblandinger af let konstruktionsbeton med Liapor 5 som tilslag, der er vist i bilag 3, er følgende vandbehov pr.  $m^3$  beton sammenfattet i tabel 5.1 afhængigt af prøveblandingsens  $n$ -forhold og  $c$ -indhold:

|     |                     | $v/c$            |             |             |             |             |
|-----|---------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|     |                     | 0,35             | 0,45        | 0,55        | 0,65        | 0,75        |
| $n$ | 0,214 <sup>1)</sup> | $c^{2)} = 537,4$ | $c = 417,9$ | $c = 356,8$ | $c = 289,7$ | $c = 261,7$ |
|     |                     | $v = 188,0$      | $v = 188,0$ | $v = 196,3$ | $v = 188,4$ | $v = 196,3$ |
|     | 0,294               | $c = 494,8$      | $c = 384,8$ | $c = 322,3$ | $c = 273,9$ | $c = 240,2$ |
|     |                     | $v = 173,1$      | $v = 173,1$ | $v = 177,3$ | $v = 178,1$ | $v = 180,1$ |
|     | 0,381               | $c = 480,8$      | $c = 384,2$ | $c = 305,9$ | $c = 265,9$ | $c = 230,3$ |
|     |                     | $v = 168,3$      | $v = 172,2$ | $v = 168,3$ | $v = 172,9$ | $v = 172,9$ |

$c$  = cement,  $kg/m^3$  betonblanding,  $v$  = vandbehov,  $kg/m^3$  betonblanding med sætmål 4-6 cm.

Tabel 5.1 Det målte vandbehov for let konstruktionsbeton fremstillet med Liapor 5 som funktion af volumenandel groft tilslag,  $v/c$ -tal og cementindhold.

- <sup>1)</sup> I stedet for de til prøveblandingerne oprindeligt ønskede niveauer for volumenandelen,  $n$ , af tilslag ( $n = 0,20, 0,30, 0,40$ ) er der benyttet et gennemsnit for  $n$ , som er bestemt på grundlag af resultaterne fra de undersøgte prøveblandinger for de forskellige niveauer af  $v/c$ -forholdet ved fastholdt ønsket niveau af  $n$ .

Afvigelserne fra de ønskede  $n$ -værdier skyldes bl.a., at det målte luftindhold (ca. 5%) var forskelligt fra forudsætningen (1,5%). Ligeledes blev sandmængden i prøveblandingerne anderledes end forudsat, se kommentar <sup>2)</sup>.

- <sup>2)</sup> Under fremstillingen af prøveblandingerne var det ikke muligt at holde cementindholdet helt konstant, hvorimod  $v/c$ -forholdet blev holdt konstant ved tilsætning af sand for at afpasse betonblandingerne til det ønskede sætmålsinterval, se hovedrapportens afsnit 4.1 for nærmere forklaring.

#### 4.1 Statistisk analyse af resultaterne i tabel 5.1.

For at undersøge om Lyse's lov gælder for let konstruktionsbeton, som fremstilles med Liapor 5, foretages en dobbelt-regressionsanalyse til opstilling af en model for vandbehovets afhængighed af n og c-forholdet.

Det forudsættes ved regressionsanalysen, at den afhængige variabel (vandbehovet) er en statistisk, normalfordelt variabel.

Den statistiske uafhængighed mellem prøveblandingerne er søgt sikret ved at udføre et fuldstændigt randomiseret forsøg, se afsnit 4.1 vedr. den opstillede forsøgsplan.

At variablen, vandbehov, er normalfordelt antages at gælde, uden at det iøvrigt er undersøgt nærmere.

Da der kun er foretaget én observation af vandbehovet for hvert værdisæt (n, c) medfører det, at man ikke kan udføre en statistisk test til vurdering af om regressionen er lineær. Istedet vurderes det på grundlag af en grafisk optegning af resultaterne om en lineær-regressionsmodel kan antages at gælde.

For teorien, der ligger til grund for en dobbelt regressionsanalyse, henvises til bilag 11.

**4.1.1 Vurdering af model 2:**  $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n}) + \beta_2 \cdot (c - \bar{c})$ , er gældende.

Model 2 henviser til, at den afhængige variabel Y afhænger af to variable, n og c.

Model 2 og de senere omtalte modeller, model 1 og model 0, er forklaret i bilag 11.

##### 4.1.1.1 Opstilling af model 2.

De statistiske begreber er beskrevet i afsnittet om dobbelt regressionanalyse bilag 11.

$$\bar{n} = 0,296$$

$$SAK_n = 1 \cdot (5 \cdot 3 - 1) \cdot 0,07059^2 = 0,06976$$

$$SAK_{\text{punkter}} = (5 \cdot 3 - 1) \cdot \frac{9,519^2}{1} = 1268,5$$

$$SAK_{\text{total}} = SAK_0 + SAK_{\text{punkter}} = 1268,5$$

$$SAP_{n,Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer...}}}{1} = 0,06976 \cdot \frac{-121,8}{1} = -8,4942$$

Bedste estimat a for  $\alpha$  er:

$$a = 179,6$$

$$\bar{c} = 349,8$$

$$SAK_c = 1 \cdot (5 \cdot 3 - 1) \cdot 97,70^2 = 133624,2$$

$$SAP_{n,Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{1} = 133624,2 \cdot \frac{(-0,004932)}{1} = -659,1$$

Da cementindholdet,  $c$ , pr.  $m^3$  ikke har kunnet holdes på absolut konstante værdier for hvert ønsket niveau af  $n$ , beregnes  $SAP_{n,c}$  der ved fastholdte niveauklasser ellers var blevet 0.

$$SAP_{n,c} = SAK_n \cdot (B_{1c\text{-værdier}}) = 0,06976 \cdot (-233,4) = -16,28$$

Herefter bestemmes de bedste estimater  $b_1$ ,  $b_2$  for  $\beta_1$  og  $\beta_2$ .

$$b_1 \cdot 0,06976 + b_2 \cdot (-16,28) = -8,4942$$

$$b_1 \cdot (-16,28) + b_2 \cdot 133624,2 = -624,1$$

$$\Downarrow$$

$$b_1 = -126,5 \quad b_2 = -0,02035$$

Den estimerede lineære regressionsmodel 2 bliver herefter.

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = 179,6 + (-126,5) \cdot (n - 0,296) + (-0,02035) \cdot (c - 349,8)$$

$$\Downarrow$$

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = 224,2 - 126,5 \cdot n - 0,02035 \cdot c$$

Da man som tidligere bemærket ikke kan teste, om den estimerede lineære regressionsmodel kan antages at passe, foretages i stedet en grafisk vurdering.

Først optegnes residualerne  $r = Y_{\text{realiseret vandbehov}} - Y_{\text{est. vandbehov}}$  mod  $Y_{\text{est. vandbehov}}$  i et retvinklet koordinatsystem.

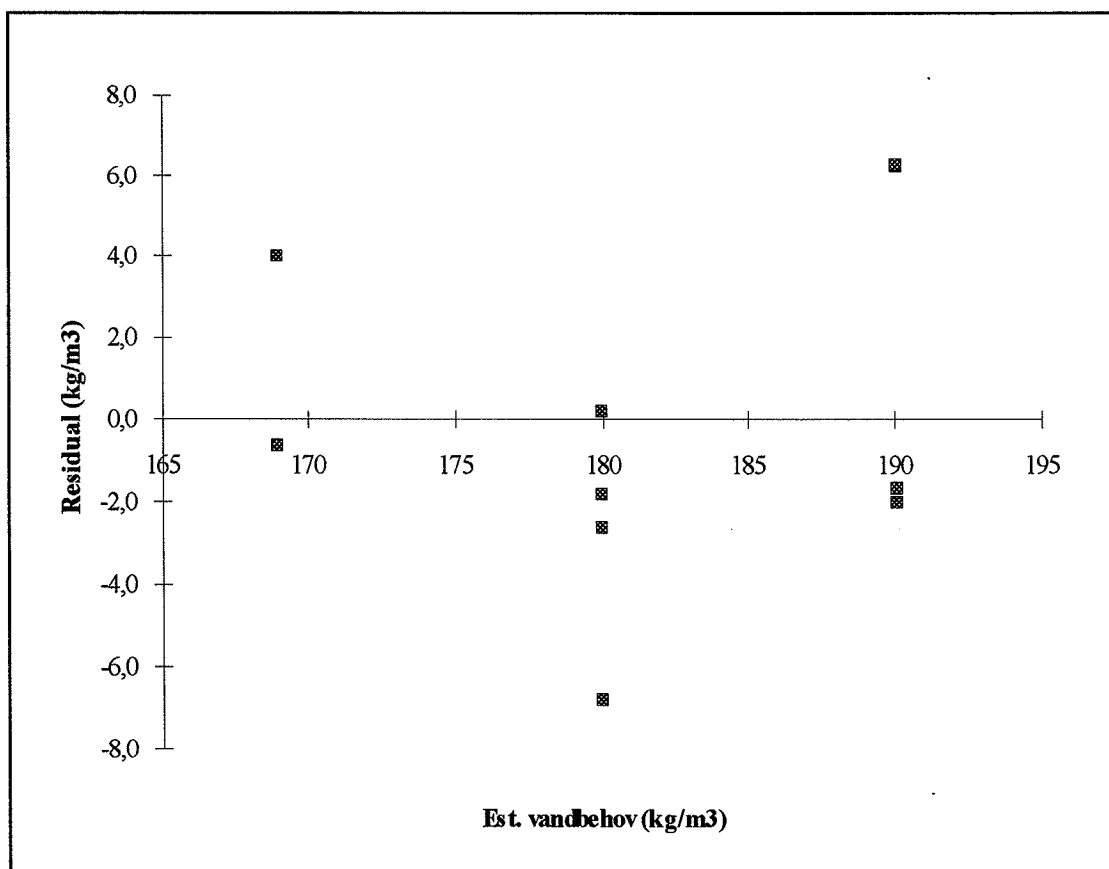
Hvis regressionsmodellen kan antages at passe, skal residualerne,  $r$ , fordele sig tilfældigt omkring x-aksen.

Residualerne beregnes, og resultaterne præsenteres i tabel 5.4.

|   |       | v/c               |                  |      |                   |                  |      |                   |                  |      |                   |                  |      |                   |                  |     |
|---|-------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|-----|
|   |       | 0,35              |                  |      | 0,45              |                  |      | 0,55              |                  |      | 0,65              |                  |      | 0,75              |                  |     |
|   |       | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$ |
| n | 0,214 | 188,0             | 190,0            | -2,0 | 188,0             | 190,0            | -2,0 | 196,3             | 190,0            | 6,3  | 188,4             | 190,0            | -1,7 | 196,7             | 190,0            | 6,3 |
|   | 0,294 | 173,1             | 179,9            | -6,8 | 173,1             | 179,9            | -6,8 | 177,3             | 179,9            | -2,6 | 178,1             | 179,9            | -1,8 | 180,1             | 179,9            | 0,2 |
|   | 0,375 | 168,3             | 168,9            | 0,2  | 172,2             | 168,9            | -0,6 | 168,3             | 168,9            | 4,0  | 172,9             | 168,9            | -0,6 | 172,9             | 168,9            | 4,0 |

Tabel 5.4 Beregnede residualværdier for vandbehov for let konstruktionsbeton med Liapor 5.

Residualværdierne er vist i figur 5.11.



Figur 5.11. Optegnede residualværdier for vandbehov for beton med Liapor 5.

Det fremgår af figur 5.11, at residualpunkterne fordeler sig rimeligt tilfældigt omkring x-aksen, hvorfor den estimerede lineære regressionsmodel 2 antages at kunne beskrive betonernes forventede vandbehov.

#### 4.1.1.2 Hypotesetestninger på regressionsmodel 2.

Da regressionsmodel 2 kan antages at gælde, foretages nu en hypotesetestning af b-værdiernes størrelse, ( $b_1$  og  $b_2$ ).

$$SAK_{\text{reg model 2}} = -126,5 \cdot (8,4942) + (-0,02035) \cdot (-659,1) = 1088,0$$

$$SAK_{\text{res model 2}} = 1268,5 - 1088,0 = 180,5$$

$$SAK_{\text{reg model 1}} = \frac{(-8,4942)^2}{0,06976} = 1034,3$$

$$SAK_{\text{res model 1}} = 1268,5 - 1034,3 = 234,2$$

$$SAK_{\text{model 1}} = 234,2 - 180,5 = 53,7$$

Tabel 5.5 er en variansanalysetabel med resultater for nedenstående hypotesetestning angivet i kolonne F.

| Variation                           | SAK    | f  | s <sup>2</sup> | F                                |
|-------------------------------------|--------|----|----------------|----------------------------------|
| Regres model 1                      | 1034,3 | 1  | 1034           | 57,4***( $F_{\text{model } 0}$ ) |
| Residual model 1 - residual model 2 | 53,7   | 1  | 53,7           | 3,57( $F_{\text{model } 1}$ )    |
| Residual model 2                    | 180,5  | 12 | 15,0           | --- <sup>1)</sup>                |
| Gentagelse                          | 0      | 0  | ---            | ---                              |
| Total                               | 1268,5 | 14 |                |                                  |

<sup>1)</sup> NB: Model 2 kan ikke testes, da  $SAK_0 = 0$ .

Tabel 5.5. Variansanalysetabel for vandbehov for beton med Liapor 5.

#### 4.1.1.3 Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængigt af cementindholdet.

Herefter foretages en hypotesetestning om

$$H_0 : b_2 = 0 \quad \text{mod } H: b_2 \neq 0$$

Dvs. en testning om den forenklede regressionsmodel 1 (tallet 1 henviser til, at der er een variabel i den lineære model, nemlig n).

$$\text{Model 1:} \quad Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n})$$

kan antages at gælde, således at vandbehovet kan antages kun at afhænge af volumenandel tilslag, n, og at være uafhængigt af cementindholdet, c.

$$\text{Tester } H_0 : b_2 = 0 \quad \text{mod } H: b_2 \neq 0$$

$$F_{\text{model } 1} > F_{0,95}(1,12) = 4,75?$$

Da  $F_{0,95}(1,12)$  ikke er større end  $F_{\text{model } 1}$  er der ingen signifikans mod hypotesen,  $H_0$ .

Det kan altså ikke afvises, at model 1 er gældende, d.v.s. at det estimerede vandbehov kan antages kun at afhænge af volumenandelen tilslag, n.

#### 4.1.1.4 Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængigt af volumenandel tilslag.

Herefter foretages en hypotesetestning om

$$H_0 : b_1 = 0 \quad \text{mod } H: b_1 \neq 0$$

Dvs. en testning om den forenkede regressionsmodel 0 (0 står for, at den afhængige variabel Y ikke afhænger af nogen variable) .

Model 0:  $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha$

kan antages at gælde, således at vandbehovet kan antages at være helt uafhængigt af både n og c.

Da model 1 ikke kan antages at gælde beregnes den poolede forsøgsfejlspredning til brug i den videre testning:

$$s^2_{m2} = \frac{53,7 + 180,5}{1 + 12} = 18,0$$

**Tester  $H_0 : b_1 = 0$  mod  $H: b_1 \neq 0$**

$$F_{\text{model 0}} > F_{0,95}(1,13) = 4,67?$$

$$> F_{0,99}(1,13) = 9,07?$$

$$> F_{0,999}(1,13) = 17,8?$$

Ja, da  $F_{\text{model 0}}$  er større end 4,67 er der en stjerne (\*) signifikans mod  $H_0$ .

Da  $F_{\text{model 0}}$  også er større end 9,07 er der \*\* signifikans mod  $H_0$ .

Da  $F_{\text{model 0}}$  ligeledes er større end 17,8 er der opnået \*\*\* signifikans mod  $H_0$ .

Der er altså \*\*\*signifikans (99,9% sandsynlighed) mod, at  $b_1 = 0$ , og dermed mod at model 0 gælder til beskrivelse af vandbehovet let konstruktionsbeton med Liapor 5. Vandbehovet for betoner, støbt med Liapor 5, kan altså ikke antages at være uafhængigt af volumenandel tilslag.

#### 4.1.2 Konklusion.

Det fremgår af ovenstående, at det estimerede vandbehov for let konstruktionsbeton, som fremstilles med Liapor 5, er uafhængigt af cementindholdet, c, men at vandbehovet kan antages at afhænge af volumenandelen, n, af tilslag efter følgende model:

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = 179,6 + (-126,5) \cdot (n - 0,296) + 0 \cdot (c - 349,8)$$

↕

$$\underline{Y_{\text{est. vandbehov}} = 217,1 - 126,5 \cdot n, n \in [0,2;0,4], c \in [220;550]} \quad (\text{b.4.1})$$

Der er således for beton med tilslagsmaterialet, Liapor 5, statistisk påvist, at Lyses lov gælder for letkonstruktionsbeton baseret på dette tilslag, fordi det forventede vandbehov, som ovenfor testet, kan afvises at afhænge af betonernes cementindhold.

## 4.2 95% konfidensinterval for det gennemsnitlige vandbehov pr. m<sup>3</sup> beton.

Herefter opstilles 95% konfidensinterval for gennemsnitlige vandbehov,  $E(Y_{\text{Est. vandbehov}} | n)$ , afhængigt af volumenandelen af tilslag,  $n$ . Konfidensintervallet beregnes på grundlag af ligning b.4.2:

For beregningsudtrykkene der ligger til grund for 95% konfidensintervallerne henvises til beskrivelsen i bilag 11.

$$E(Y_{\text{Est. vandbehov}} | n) =$$

$$[a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) - t_{0,975} (f_m) \cdot s_m \cdot \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(n - \bar{n})^2}{\text{SAK}_n}} ; a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + t_{0,975} (f_m) \cdot s_m \cdot \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(n - \bar{n})^2}{\text{SAK}_n}}] \quad (\text{b.4.2})$$

hvor  $t_{0,975}(13) = 2,16$  og  $s_{m2}^2 = 18,0$ .

Ligning b.4.2 medfører, at 95% konfidensintervallet kan beregnes som ligning b.4.3.

$$E(Y_{\text{Est. vandbehov}} | n) =$$

$$[217,1 - 126,5 \cdot n - 2,16 \cdot \sqrt{18,0} \cdot \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{(n - 0,296)^2}{0,06976}} ; 217,1 - 126,5 \cdot n + 2,16 \cdot \sqrt{18,0} \cdot \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{(n - 0,296)^2}{0,06976}}]$$

Lign. (b.4.4)

Konfidensintervallerne for vandbehovet som funktion af enkelte  $n$ -værdier er angivet nedenfor:

|               |                                          |
|---------------|------------------------------------------|
| $n = 0,214$ , | $\Rightarrow [186 ; 194] \text{ kg/m}^3$ |
| $n = 0,294$   | $\Rightarrow [178 ; 188] \text{ kg/m}^3$ |
| $n = 0,381$   | $\Rightarrow [165 ; 173] \text{ kg/m}^3$ |

## Bilag 5

### ANALYSE AF VANDBEHOV FOR LET KONSTRUKTIONSBETON SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENTINDHOLD, $c$ , TIL VURDERING AF GYLDIGHEDEN AF LYES LOV.

#### 5.0 VANDBEHOV SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENTINDHOLD, $c$ , FOR KONSTRUKTIONSBETON MED LECA 4/8 SOM GROFT TILSLAG.

På grundlag af resultaterne fra de gennemførte prøveblandinger af let konstruktionsbeton med LECA 4/8 som tilslag, der er vist i bilag 3, er følgende vandbehov pr.  $m^3$  beton sammenfattet i tabel 5.2 afhængigt af prøveblandingsens  $n$ -forhold og  $c$ -indhold:

|     |                     | $v/c$            |             |             |             |             |
|-----|---------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|     |                     | 0,35             | 0,45        | 0,55        | 0,65        | 0,75        |
| $n$ | 0,216 <sup>1)</sup> | $c^{2)} = 542,2$ | $c = 421,6$ | $c = 350,8$ | $c = 306,0$ | $c = 259,1$ |
|     |                     | $v = 189,7$      | $v = 189,7$ | $v = 193,0$ | $v = 199,0$ | $v = 194,3$ |
|     | 0,300               | $c = 501,8$      | $c = 388,3$ | $c = 330,4$ | $c = 280,9$ | $c = 242,4$ |
|     |                     | $v = 175,6$      | $v = 175,6$ | $v = 174,8$ | $v = 181,8$ | $v = 182,7$ |
|     | 0,375               | $c = 477,7$      | $c = 371,5$ | $c = 309,9$ | $c = 258,4$ | $c = 226,2$ |
|     |                     | $v = 167,2$      | $v = 167,2$ | $v = 170,5$ | $v = 168,0$ | $v = 169,7$ |

$c$  = cement  $kg/m^3$  betonblanding,  $v$  = vandbehovet,  $kg/m^3$ , for betonblanding med sætmål 4-6 cm.

Tabel 5.2 Det målte vandbehov for let konstruktionsbeton med LECA 4/8 som funktion af volumenandel groft tilslag,  $v/c$ -tal og cementindhold.

- <sup>1)</sup> I stedet for de til prøveblandingerne oprindeligt ønskede niveauer for volumenandelen,  $n$ , af tilslag ( $n = 0,20, 0,30, 0,40$ ) er der benyttet et gennemsnit for  $n$ , som er bestemt på grundlag af resultaterne fra de undersøgte prøveblandinger for de forskellige niveauer af  $v/c$ -forholdet ved fastholdt ønsket niveau af  $n$ .

Afviselserne fra de ønskede  $n$ -værdier skyldes bl.a., at det målte luftindhold (ca. 5%) var forskelligt fra forudsætningen (1,5%). Ligeledes blev sandmængden i prøveblandingerne anderledes end forudsat, se kommentar <sup>2)</sup>.

- <sup>2)</sup> Under fremstillingen af prøveblandingerne var det ikke muligt at holde cementindholdet helt konstant, hvorimod  $v/c$ -forholdet blev holdt konstant ved tilsætning af sand for at afpasse betonblandingerne til det ønskede sætmålsinterval, se hovedrapportens afsnit 4.1 for nærmere forklaring.

## 5.1 Statistisk analyse af resultaterne i tabel 5.2.

For at undersøge om Lyse's lov gælder for let konstruktionsbeton, baseret på LECA 4/8 foretages en dobbelt-regressionsanalyse til opstilling af en lineær model for vandbehovets afhængighed af n og c-forholdet.

Efter tilsvarende overvejelser omkring forudsætningerne for regressionsanalyse, som er foretaget i bilag 4 afsnit 4.1.1 vedr. beton med Liapor 5, foretages herefter den statistiske undersøgelse af forsøgsresultaterne.

For teorien, der ligger til grund for en dobbelt regressionsanalyse, henvises til bilag 11.

**5.1.1 Vurdering af model 2:**  $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (\overline{n-n}) + \beta_2 \cdot (\overline{c-c})$ , er gældende.

### 5.1.1.1 Opstilling af model 2.

$$\overline{n} = 0,297$$

$$SAK_n = 1 \cdot (5 \cdot 3 - 1) \cdot 0,06723^2 = 0,06327$$

$$SAK_{\text{punkter}} = (5 \cdot 3 - 1) \cdot \frac{10,83^2}{1} = 1641,4$$

$$SAK_{\text{total}} = SAK_0 + SAK_{\text{punkter}} = 1641,4$$

$$SAP_{n,Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{1} = 0,06327 \cdot \frac{-154,66}{1} = -9,7854$$

Bedste estimat a for  $\alpha$  er:

$$a = 180,33$$

$$\overline{c} = 351,1$$

$$SAK_c = 1 \cdot (5 \cdot 3 - 1) \cdot 98,41^2 = 135588,5$$

$$SAP_{n,Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{1} = 135588,5 \cdot \frac{-6,95 \cdot 10^{-5}}{1} = -9,4233$$

Da cementindholdet, c, pr. m<sup>3</sup>, ikke har kunnet holdes på absolut konstante værdier for hvert ønsket niveau af n, beregnes  $SAP_{n,c}$  der ved fastholdte nivauklasser ellers var blevet 0.

$$SAP_{n,c} = SAK_n \cdot (B_1 \text{ c-værdier}) = 0,06327 \cdot (-297,39) = -18,82$$

Herefter bestemmes de bedste estimater  $b_1$ ,  $b_2$  for  $\beta_1$  og  $\beta_2$ .

$$b_1 \cdot 0,06327 + b_2 \cdot (-18,82) = -9,7854$$

$$b_1 \cdot (-18,82) + b_2 \cdot 135588,5 = -9,4233$$

↓

$$b_1 = -161,3 \quad b_2 = -0,02246$$

Den estimerede lineære regressionsmodel 2 kan herefter udtrykkes ved ligningen.

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = 180,3 + (-161,3) \cdot (n - 0,297) + (-0,02246) \cdot (c - 351,1)$$

↓

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = 236,1 - 161,3 \cdot n - 0,02246 \cdot c$$

Da man som tidligere bemærket ikke kan teste, om den estimerede lineære regressionsmodel kan antages at passe, foretages i stedet en grafisk vurdering.

Først optegnes residualerne  $r = Y_{\text{realiseret vandbehov}} - Y_{\text{est. vandbehov}}$  mod  $Y_{\text{est. vandbehov}}$  i et retvinklet koordinatsystem.

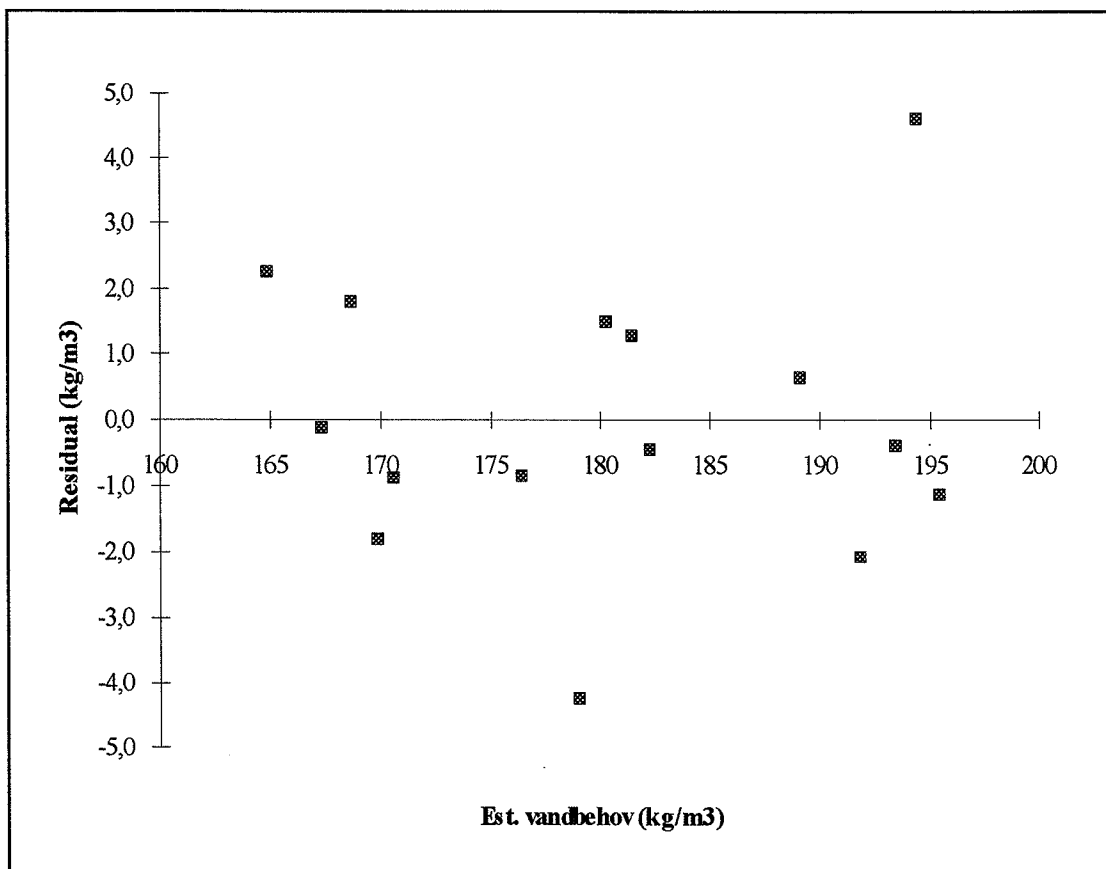
Hvis regressionsmodellen kan antages at passe, skal residualerne,  $r$ , fordele sig tilfældigt omkring x-aksen.

Residualerne beregnes, og resultaterne præsenteres i tabel 5.6.

|   |       | v/c               |                  |      |                   |                  |      |                   |                  |      |                   |                  |      |                   |                  |      |
|---|-------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|
|   |       | 0,35              |                  |      | 0,45              |                  |      | 0,55              |                  |      | 0,65              |                  |      | 0,75              |                  |      |
|   |       | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  |
| n | 0,216 | 189,7             | 189,1            | 0,6  | 189,7             | 191,8            | -2,1 | 193,0             | 193,4            | -0,4 | 199,0             | 194,4            | 4,6  | 194,3             | 195,4            | 1,1  |
|   | 0,300 | 175,6             | 176,4            | -0,8 | 175,6             | 179,0            | -4,2 | 174,8             | 180,3            | 1,5  | 181,8             | 181,4            | 1,3  | 182,7             | 182,3            | -0,5 |
|   | 0,375 | 167,2             | 164,9            | 2,3  | 167,2             | 167,3            | -0,1 | 170,5             | 168,7            | 1,8  | 168,0             | 169,8            | -1,8 | 169,7             | 170,5            | -0,9 |

Tabel 5.6 Beregnede residualværdier for vandbehov for let konstruktionsbeton med LECA 4/8.

Residualværdierne er vist i figur 5.12.



Figur 5.12. Optegnede residualværdier for vandbehov for beton med LECA 4/8.

Det fremgår af figur 5.12, at punkterne fordeler sig rimeligt tilfældigt omkring x-aksen, hvorfor den estimerede lineære regressionsmodel 2 antages at kunne beskrive betonernes forventede vandbehov.

#### 5.1.1.2 Hypotesetestninger på regressionsmodel 2.

Da regressionsmodel 2 kan antages at gælde, foretages nu en hypotesetestning af b-værdiernes størrelse.

$$SAK_{\text{reg model 2}} = -161,3 \cdot (-9,7854) + (-0,02246) \cdot (-9,423) = 1579,0$$

$$SAK_{\text{res model 2}} = 1641,4 - 1579,0 = 62,4$$

$$SAK_{\text{reg model 1}} = \frac{(-9,7854)^2}{0,06327} = 1513,4$$

$$SAK_{\text{res model 1}} = 1641,4 - 1513,4 = 128,0$$

$$SAK_{\text{model 1}} = 128,0 - 62,4 = 65,6$$

Tabel 5.7 er en variansanalysetabel med resultater for nedenstående hypotesetestning angivet i kolonne F.

| Variation                           | SAK    | f  | s <sup>2</sup> | F                             |
|-------------------------------------|--------|----|----------------|-------------------------------|
| Regres model 1                      | 1513,4 | 1  |                |                               |
| Residual model 1 - residual model 2 | 65,6   | 1  | 65,6           | 12,6**(F <sub>model 1</sub> ) |
| Residual model 2                    | 62,4   | 12 | 5,20           | --- <sup>1)</sup>             |
| Gentagelse                          | 0      | 0  | ---            | ---                           |
| Total                               | 1641,4 | 14 |                |                               |

<sup>1)</sup> NB: Model 2 kan ikke testes, da SAK<sub>0</sub> = 0.

Tabel 5.7. Variansanalysetabel for LECA 4/8.

### 5.1.1.3 Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængigt af cementindholdet.

Herefter foretages en hypotesetestning om

$$H_0 : b_2 = 0 \quad \text{mod } H: b_2 \neq 0$$

Dvs. en testning om den forenklede regressionsmodel 1

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n-n)$$

kan antages at gælde, således at vandbehovet kan antages kun at afhænge af volumenandelen tilslag, n, og at være uafhængigt af cementindholdet, c.

**Tester  $H_0 : b_2 = 0$  mod  $H: b_2 \neq 0$**

$$F_{\text{model 1}} > F_{0,95}(1,12) = 4,75?$$

$$> F_{0,99}(1,12) = 9,33?$$

$$> F_{0,999}(1,12) = 18,6?$$

Ja, da  $F_{\text{model 1}}$  er større end 4,67 er der \* signifikans mod  $H_0$ .

Da  $F_{\text{model 1}}$  også er større end 9,07 er der \*\* signifikans mod  $H_0$ .

Men da  $F_{\text{model 0}}$  ikke er større end 17,8 er der ikke opnået \*\*\* signifikans mod  $H_0$ .

Der er altså \*\* signifikans (99 % sandsynlighed) mod, at model 1 alene gælder, vandbehovet kan altså ikke antages alene at afhænge af tilslagets volumenandel.

### 5.1.2 Konklusion.

Dvs. det estimerede vandbehov afhænger altså af volumenandelen,  $n$ , af tilslag og cementindholdet,  $c$ , efter følgende model:

$$\underline{Y_{\text{est. vandbehov}} = 236,1 - 161,3 \cdot n - 0,02246 \cdot c, n \in [0,2;0,4], c \in [225;550]} \quad (b5.1)$$

For let konstruktionsbeton, der fremstilles med tilslagsmaterialet, LECA 4/8, man kan derfor ikke statistisk påvise, at Lyse's lov gælder, fordi man ikke kan afvise, at det forventede vandbehov, som ovenfor testet, afhænger af betonernes cementindhold. Dog er indflydelsen af cementindholdet mange gange mindre end indflydelsen af volumenandel tilslag.

Hvis man vælger at se bort fra indflydelsen fra cementindholdet på vandbehovet i betonen, kan der beregnes følgende ligning for det estimerede vandbehov:

$$\begin{aligned} Y_{\text{est. vandbehov}} &= 180,3 + (-161,3) \cdot (n - 0,297) + 0 \cdot (c - 351,1) \\ \Downarrow \\ \underline{Y_{\text{est. vandbehov}} &= 228,2 - 161,3 \cdot n, n \in [0,2;0,4], c \in [225;550]} \end{aligned} \quad (b5.2)$$

### 5.2 95% konfidensinterval for det gennemsnitlige vandbehov pr. m<sup>3</sup> beton.

Herefter opstilles 95% konfidensinterval for gennemsnitlige vandbehov,  $E(Y_{\text{Est. vandbehov}} | n)$ , afhængigt af volumenandelen tilslag,  $n$ , og cementindholdet,  $c$ . Konfidensintervallerne beregnes på grundlag af ligning b.5.3.

For beregningsudtrykkene der ligger til grund for 95% konfidensintervallerne henvises til beskrivelsen i bilag 11.

$$E(Y_{\text{Est. vandbehov}} | n) =$$

$$[a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c - \bar{c}) - t_{0,975} \cdot (f_m) \cdot s_m \cdot K_2; a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c - \bar{c}) + t_{0,975} \cdot (f_m) \cdot s_m \cdot K_2] \quad \text{Lign. (b.5.3)}$$

$$\text{hvor } t_{0,975}(12) = 2,18 \text{ og } s_{m1}^2 = 5,20$$

For beregning af værdien  $K_2$  beregnes værdien  $D_{n-c}$ .

$$D_{n-c} = 0,06327 \cdot 135588,5 - (-18,82)^2 = 8224$$

hvorefter beregningsudtrykket for  $K_2$  lader sig opstille i form af ligning b.5.4.

$$K_2 = \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{0,06327 \cdot (c - 351,1)^2 + 135588,5 \cdot (n - 0,297)^2 - 2 \cdot (-18,82) \cdot (n - 0,297) \cdot (c - 351,1)}{8224}} \quad (b.5.4)$$

Ligning b.5.4 medfører, at 95% konfidensintervallet kan beregnes i henhold til ligning b.5.5.

$$E(Y_{\text{Est. vandbehov}} | n) =$$

$$\frac{[236,1 - 161,3 \cdot n - 0,02246 \cdot c - 2,18 \cdot \sqrt{5,20} \cdot K_2 ; 236,1 - 161,3 \cdot n - 0,02246 \cdot c + 2,18 \cdot \sqrt{5,20} \cdot K_2]}{2}$$

Lign. (b.5.5.)

Eksempler på konfidensintervaller for det gennemsnitlige estimat på vandbehovet som funktion af n og c for let konstruktionsbeton, som er fremstillet med LECA 4/8, er beregnet til at have de værdier, der er vist nedenfor:

Udvalgte konfidensintervaller for vandbehovet til let konstruktionsbeton med LECA 4/8, med sætmål 4-8 cm.

$$n = 0,216, c = 542 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow [186 ; 192] \text{ kg/m}^3$$

$$n = 0,216, c = 259 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow [192 ; 198] \text{ kg/m}^3$$

$$n = 0,300, c = 501 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow [174 ; 179] \text{ kg/m}^3$$

$$n = 0,300, c = 242 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow [180 ; 184] \text{ kg/m}^3$$

$$n = 0,375, c = 478 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow [162 ; 168] \text{ kg/m}^3$$

$$n = 0,375, c = 226 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow [168 ; 173] \text{ kg/m}^3$$

## Bilag 6

### ANALYSE AF VANDBEHOV FOR LET KONSTRUKTIONSBETON SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENTINDHOLD, $c$ , TIL VURDERING AF GYLDIGHEDEN AF LYES LOV.

#### 6.0 VANDBEHOV SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENTINDHOLD, $c$ , FOR KONSTRUKTIONSBETON MED LECA T SOM GROFT TILSLAG.

På grundlag af resultaterne fra de gennemførte prøveblandinger af let konstruktionsbeton med LECA T som tilslag, der er vist i bilag 3, er følgende vandbehov pr.  $m^3$  beton sammenfattet i tabel 5.3 afhængigt af prøveblandingsens  $n$ -forhold og  $c$ -indhold:

|   |                     | v/c                    |          |          |          |          |
|---|---------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
|   |                     | 0,35                   | 0,45     | 0,55     | 0,65     | 0,75     |
| n | 0,213 <sup>1)</sup> | c <sup>2)</sup> =545,1 | c= 416,8 | c= 349,7 | c= 298,8 | c= 254,5 |
|   |                     | v= 190,7               | v= 187,6 | v= 192,4 | v= 194,3 | v= 190,9 |
|   | 0,299c<br>= 501,8   | c= 393,2               | c= 322,0 | c= 278,1 | c= 244,0 |          |
|   |                     | v= 175,6               | v= 176,9 | v= 177,2 | v= 180,9 | v= 183,0 |
|   | 0,375               | c= 478,2               | c= 375,2 | c= 307,6 | c= 258,4 | c= 220,8 |
|   |                     | v= 170,5               | v= 168,8 | v= 169,2 | v= 168,0 | v= 165,6 |

$c$  = cement  $kg/m^3$  betonblanding,  $v$  = vandbehov,  $kg/m^3$  betonblanding med LECA T med sætmål 4-8 cm.

Tabel 5.3 Det målte vandbehov for let konstruktionsbeton med LECA T, som funktion af volumenandel groft tilslag,  $v/c$ -tal og cementindhold.

- <sup>1)</sup> I stedet for de til prøveblandingerne oprindeligt ønskede niveauer for volumenandelen,  $n$ , af tilslag ( $n = 0,20, 0,30, 0,40$ ) er der benyttet et gennemsnit for  $n$ , som er bestemt på grundlag af resultaterne fra de undersøgte prøveblandinger for de forskellige niveauer af  $v/c$ -forholdet ved fastholdt ønsket niveau af  $n$ .

Afvigelserne fra de ønskede værdier skyldes bl.a., at det målte luftindhold (ca. 5%) var forskelligt fra forudsætningen (1,5%). Ligeledes blev sandmængden i prøveblandingerne anderledes end forudsat, se kommentar <sup>2)</sup>.

- <sup>2)</sup> Under fremstillingen af prøveblandingerne var det ikke muligt at holde cementindholdet helt konstant, hvorimod  $v/c$ -forholdet blev holdt konstant ved tilsætning af sand for at afpasse betonblandingerne til det ønskede sætmålsinterval, se hovedrapportens afsnit 4.1 for nærmere forklaring.

## 6.1 Statistisk analyse af resultaterne i tabel 5.3.

For at undersøge om Lyse's lov gælder for let konstruktionsbeton, som fremstilles med LECA T, foretages en dobbelt-regressionsanalyse til opstilling af en model for vandbehovets afhængighed af n og c-forholdet.

Efter tilsvarende overvejelser omkring forudsætningerne for regressionsanalyse, som er foretaget i bilag 4 afsnit 4.1.1 vedr. beton med Liapor 5 foretages, herefter den statistiske undersøgelse af forsøgsresultaterne.

For teorien der ligger til grund for en dobbelt regressionsanalyse henvises til bilag 11.

**6.1.1 Vurdering af model 2:**  $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (\overline{n-n}) + \beta_2 \cdot (\overline{c-c})$ , er gældende.

### 6.1.1.1 Opstilling af model 2.

$$\overline{n} = 0,296$$

$$SAK_n = 1 \cdot (5 \cdot 3 - 1) \cdot 0,06850^2 = 0,06569$$

$$SAK_{\text{punkter}} = (5 \cdot 3 - 1) \cdot \frac{9,910^2}{1} = 1374,9$$

$$SAK_{\text{total}} = SAK_0 + SAK_{\text{punkter}} = 1374,9$$

$$SAP_{n,Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{1} = 0,06569 \cdot \frac{-140,59}{1} = -9,2358$$

Bedste estimat a for  $\alpha$  er:

$$a = 179,44$$

$$\overline{c} = 350,2$$

$$SAK_c = 1 \cdot (5 \cdot 3 - 1) \cdot 100,96^2 = 142706,3$$

$$SAP_{n,Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{1} = 142706,3 \cdot \frac{0,01083}{1} = 1546,0$$

Da cementindholdet, c, pr. m<sup>3</sup> ikke har kunnet holdes på absolut konstante værdier for hvert ønsket niveau af n, beregnes  $SAP_{n,c}$ , der ved fastholdte nivauklasser ellers var blevet 0.

$$SAP_{n,c} = SAK_n \cdot (B_1 \text{ c-værdier}) = 0,06569 \cdot (-268,9) = -17,53$$

Herefter bestemmes de bedste estimater  $b_1$ ,  $b_2$  for  $\beta_1$  og  $\beta_2$ .

$$b_1 \cdot 0,06569 + b_2 \cdot (-17,53) = -9,2358$$

$$b_1 \cdot (-17,53) + b_2 \cdot 142706,3 = 1546,0$$

$$\Downarrow$$

$$b_1 = -142,4 \quad b_2 = -0,006654$$

Den estimerede lineære regressionsmodel 2 kan herefter udtrykkes ved ligningen.

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = 179,4 + (-142,4) \cdot (n - 0,296) + (-0,006654) \cdot (c - 350,2)$$

$$\Downarrow$$

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = 223,9 - 142,4 \cdot n - 0,00665 \cdot c$$

Da man som tidligere bemærket ikke kan teste, om den estimerede lineære regressionsmodel kan antages at passe, foretages i stedet en grafisk vurdering.

Først optegnes residualerne  $r = Y_{\text{realiseret vandbehov}} - Y_{\text{est. vandbehov}}$  mod  $Y_{\text{est. vandbehov}}$  i et retvinklet koordinatsystem.

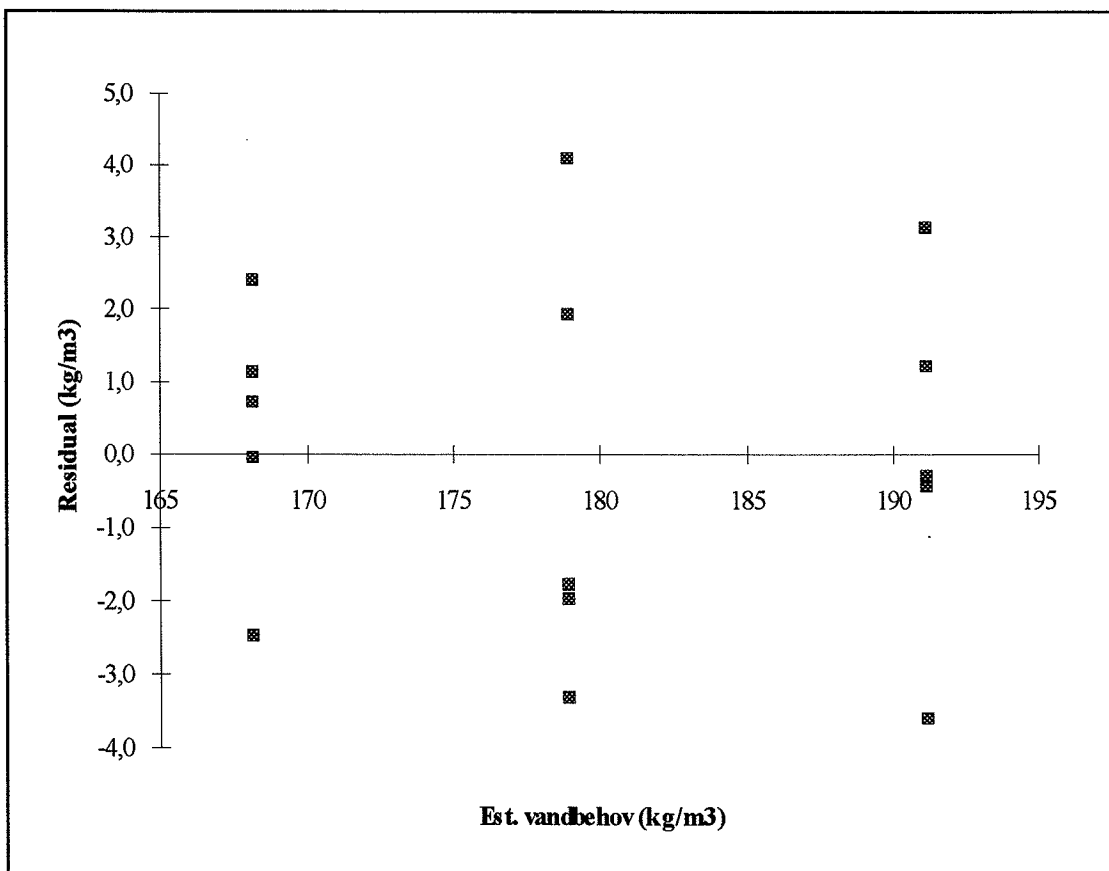
Hvis regressionsmodellen kan antages at passe skal residualerne,  $r$ , fordele sig tilfældigt omkring x-aksen.

Residualerne beregnes, og resultaterne præsenteres i tabel 5.8.

|   |       | v/c               |                  |      |                   |                  |      |                   |                  |      |                   |                  |      |                   |                  |      |
|---|-------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|
|   |       | 0,35              |                  |      | 0,45              |                  |      | 0,55              |                  |      | 0,65              |                  |      | 0,75              |                  |      |
|   |       | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$  |
| n | 0,213 | 190,7             | 191,2            | -0,4 | 187,6             | 191,2            | -3,6 | 192,4             | 191,2            | 1,2  | 194,3             | 191,2            | 3,1  | 190,9             | 191,2            | -0,3 |
|   | 0,299 | 175,6             | 178,9            | -3,3 | 176,9             | 178,9            | -2,0 | 177,2             | 178,9            | -1,8 | 180,9             | 178,9            | 1,9  | 183,0             | 178,9            | 4,1  |
|   | 0,375 | 170,5             | 168,1            | 2,4  | 168,8             | 168,1            | 0,7  | 169,2             | 168,1            | 1,1  | 168,0             | 168,1            | -0,1 | 165,6             | 168,1            | -2,5 |

Tabel 5.8 Beregnede residualværdier for vandbehovet for let konstruktionsbeton med LECA T.

Residualværdierne er vist i figur 5.13.



Figur 5.13. Optegnede residualværdier for vandbehov for beton med LECA T.

Det fremgår af figur 5.13, at punkterne fordeler sig rimeligt tilfældigt omkring x-aksen, hvorfor den estimerede lineære regressionsmodel 2 antages at kunne beskrive betonernes forventede vandbehov.

#### 6.1.1.2 Hypotesetestninger på regressionsmodel 2.

Da regressionsmodel 2 kan antages at gælde, foretages nu en hypotesetestning af b-værdierens størrelse.

$$SAK_{\text{reg model 2}} = -142,4 \cdot (9,2358) + (-0,006654) \cdot 1546,0 = 1304,9$$

$$SAK_{\text{res model 2}} = 1374,9 - 1304,9 = 70,0$$

$$SAK_{\text{reg model 1}} = \frac{(-9,2358)^2}{0,06569} = 1298,5$$

$$SAK_{\text{res model 1}} = 1374,9 - 1298,5 = 76,4$$

$$SAK_{\text{model 1}} = 76,4 - 70,0 = 6,4$$

Tabel 5.5 er en variansanalysetabel med resultater for nedenstående hypotesetestning angivet i kolonne F.

| Variation                              | SAK    | f  | s <sup>2</sup> | F                              |
|----------------------------------------|--------|----|----------------|--------------------------------|
| Regres model 1                         | 1298,5 | 1  | 1298,5         | 204***( $F_{\text{model 0}}$ ) |
| Residual model 1 -<br>residual model 2 | 6,4    | 1  | 6,4            | 1,1( $F_{\text{model 1}}$ )    |
| Residual model 2                       | 70,0   | 12 | 5,83           | --- <sup>1)</sup>              |
| Gentagelse                             | 0      | 0  | ---            | ---                            |
| Total                                  | 1374,9 | 14 |                |                                |

<sup>1)</sup> NB: Model 2 kan ikke testes, da  $SAK_0 = 0$ .

Tabel 5.9. Variansanalysetabel for vandbehov for beton med LECA T.

#### 6.1.1.3 Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængig af cementindholdet.

Herefter foretages en hypotesetestning om

$$H_0 : b_2 = 0 \quad \text{mod } H: b_2 \neq 0$$

Dvs. en testning om den forsimplede regressionsmodel 1

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n-n)$$

kan antages at gælde således, at vandbehovet kan antages kun at afhænge af volumenandelen tilslag, n, og at være uafhængigt af cementindholdet, c.

**Tester  $H_0 : b_2 = 0$  mod  $H: b_2 \neq 0$**

$$F_{\text{model 1}} > F_{0,95}(1,12) = 4,75. \quad \text{Da } F_{0,95}(1,12) \text{ ikke er større end } F_{\text{model 1}} \text{ er der ingen signifikans mod hypotesen, } H_0.$$

Det kan altså ikke afvises, at model 1 er gældende. Det kan altså antages, at vandindholdet kun afhænger af volumenandel tilslag.

#### 6.1.1.4 Testning af om vandbehovet kan antages at være uafhængigt af volumenandel tilslag.

Herefter foretages der en hypotesetestning om

$$H_0 : b_1 = 0 \quad \text{mod } H: b_1 \neq 0$$

Dvs. en testning om den forenkede regressionsmodel 0,

$$Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha,$$

kan antages at gælde, således at vandbehovet kan antages at være helt uafhængigt af både n og c.

Da model 1 kan antages at gælde beregnes den poolede forsøgsfejlsspredning til brug i den videre testning.

$$s_{m2}^2 = \frac{70,0 + 6,4}{1 + 12} = 6,37$$

Tester  $H_0 : b_1 = 0$  mod  $H: b_1 \neq 0$

$$F_{\text{model } 0} > F_{0,95}(1,13) = 4,67?$$

Ja, da  $F_{\text{model } 0}$  er større end 4,67 er der en stjerne (\*) signifikans mod  $H_0$ .

$$> F_{0,99}(1,13) = 9,07?$$

Da  $F_{\text{model } 0}$  også er større end 9,07 er der \*\* signifikans mod  $H_0$ .

$$> F_{0,999}(1,13) = 17,8?$$

Da  $F_{\text{model } 0}$  ligeledes er større end 17,8 er opnået \*\*\* signifikans mod  $H_0$ .

Der er altså \*\*\*signifikans (99,9% sandsynlighed) mod, at  $b_1 = 0$ , og dermed mod at model 0 gælder til beskrivelse af vandbehovet let konstruktionsbeton med LECA T. Vandbehovet for betoner, støbt med LECA T, kan altså ikke antages at være uafhængigt af volumenandel tilslag.

### 6.1.2 Konklusion.

Det fremgår af ovenstående, at det estimerede vandbehov er uafhængigt af cementindholdet,  $c$ , men at vandbehovet kan antages at afhænge af volumenandelen,  $n$ , tilslag efter følgende model:

$$\underline{Y_{\text{est. vandbehov}} = 221,5 - 142,4 \cdot n, n \in [0,2;0,4], c \in [220;550]}$$

Der er således for beton med tilslagsmaterialet, LECA T, statistisk påvises, at Lyse's lov gælder, da det forventede vandbehov, som ovenfor testet, kan afvises at afhænge af betonernes cementindhold.

### 6.2 95% konfidensinterval for det gennemsnitlige vandbehov pr. $m^3$ beton.

Herefter opstilles 95% konfidensinterval for det gennemsnitlige vandbehov afhængigt af volumenandelen af tilslag,  $n$ , konfidensintervaller beregnet på grundlag af ligning b.6.1:

For beregningsudtrykkene der ligger til grund for 95% konfidensintervallerne henvises til beskrivelsen i bilag 11.

$$E(Y_{\text{Est. vandbehov}} | n) =$$

$$[a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) - t_{0,975} (f_m) \cdot s_m \cdot \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(n - \bar{n})^2}{SAK_n}} ; a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + t_{0,975} (f_m) \cdot s_m \cdot \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(n - \bar{n})^2}{SAK_n}}] \quad (b.6.1)$$

hvor  $t_{0,975}(13) = 2,16$  og  $s_{m2}^2 = 6,37$ .

Ligning b.6.1 medfører, at 95% konfidensintervallet kan beregnes som følger:

$$E(Y_{\text{Est. vandbehov}} | n) =$$

$$\left[ 221,5 - 142,4 \cdot n - 2,16 \cdot \sqrt{6,37} \cdot \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{(n - 0,296)^2}{0,06569}} ; 221,5 - 142,4 \cdot n + 2,16 \cdot \sqrt{6,37} \cdot \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{(n - 0,296)^2}{0,06569}} \right]$$

Lign. (b.6.2)

Konfidensintervallerne for vandbehovet som funktion af enkelte n-værdier er angivet nedenfor:

$$n = 0,213 \quad \Rightarrow [189 ; 193] \text{ kg/m}^3$$

$$n = 0,299 \quad \Rightarrow [177 ; 180] \text{ kg/m}^3$$

$$n = 0,375 \quad \Rightarrow [166 ; 170] \text{ kg/m}^3$$

## ANALYSE AF OPNÅEDE BETONBRUDSTYRKER FOR LET KONSTRUKTIONSBETON SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENT/VAND-FORHOLD, $c/v$ , TIL VURDERING GYLDIGHEDEN AF BOLOMEYS LOV

### 7.0 UNDERSØGELSE AF GYLDIGHEDEN AF BOLOMEY'S LOV FOR LET KONSTRUKTION BETON MED LIAPOR 5 SOM GROFT TILSLAG.

De gennemsnitlige brudstyrkeresultater af 6 prøvecylindre for hvert valgt niveau af volumenandel groft tilslag,  $n$ , og  $c/v$ -forholdet er vist i tabel 6.1. De enkelte brudstyrkeresultater for hver prøvecylinder er præcenteret i bilag 10.

|     |       | $c / v$  |          |          |          |          |
|-----|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
|     |       | 1 / 0,35 | 1 / 0,45 | 1 / 0,55 | 1 / 0,65 | 1 / 0,75 |
| $n$ | 0,214 | 34,82    | 29,93    | 22,11    | 19,72    | 15,57    |
|     | 0,294 | 35,20    | 25,81    | 23,09    | 17,36    | 14,68    |
|     | 0,381 | 28,27    | 25,96    | 20,51    | 16,63    | 13,71    |

Tabel 6.1. Gennemsnitlige 28-døgns brudstyrker, MPa, for let konstruktionsbeton fremstillet med Liapor 5.

### 7.1 Statistisk analyse af resultaterne i tabel 6.1.

For at undersøge om Bolomeys lov gælder for let konstruktionsbeton, der fremstilles med Liapor 5, foretages en dobbelt-regressionsanalyse til opstilling af en model for brudstyrkens afhængighed af  $n$  og  $c/v$ -forhold.

Som tidligere beskrevet, kræver en regressionsanalyse, at resultaterne er normalfordelte og statistisk uafhængige, både inden for hver prøveserie og mellem alle forsøgskombinationer. Samtidigt kræves, at der er varianshomogenitet.

At brudstyrkerne er normalfordelte kan antages gælde på basis af en oversigtsmæssig vurdering af de seks brudstyrkeresultater inden for hver prøveserie. Der henvises til resultatskemaerne for de tre tilslagsmaterialer i bilag 10.

Med hensyn til kravet om overholdelse af varianshomogenitet, kan man ved at betragte den beregnede spredning inden for hver prøveserie se, at der ikke forekommer enkelte prøvningsspredninger, som er så meget større end de gennemsnitlige spredninger, at de bør lades ude af betragtning ved regressionsanalysen. Der foretages derfor ingen statistisk test vedrørende overholdelse af varianshomogenitet; men der kunne være foretaget en "Bartlett's test", se bilag 12.

Den statistiske uafhængighed mellem hver prøveserie er, som tidligere beskrevet, opnået ved randomiseret valg af prøveserie i forbindelse med fremstillingsrækkefølgen.

Under forsøgsplanlægningen til forsøgsrækken blev forsøgene tilrettelagt således, at hver prøveseries brudstyrkeresultat blev bestemt på grundlag af seks gentagelser. Som udgangspunkt blev der således regnet med, at der forekom seks uafhængige gentagelser for hver prøveserie. Men efter forsøgsplanens gennemførelse, erkendtes det, at man ikke kan antage statistisk uafhængighed inden for prøvningsserien, fordi alle betoncylindre stammer fra een og samme prøveblanding.

Regressionsanalysen er derfor foretaget under erkendelse af, at der kun forekommer een gentagelse af forsøgsplanen, men at brudstyrken i hver forsøgskombination er bestemt på grundlag af gennemsnittet af seks brudstyrkeobservationer.

Beregningerne i forbindelse med den dobbelte regressionsanalyse foretages nedenfor. Teorien, der ligger til grund for en dobbelt regressionsanalyse samt de statistiske begreber er præsenteret i afsnittet om dobbelt regressionanalyse bilag 11.

**7.1.1 Vurdering af model 2:**  $Y_{\text{est. brudstyrke}} = \alpha + \beta_1 \cdot (\overline{n}) + \beta_2 \cdot (\overline{c/v - c/v})$ , er gældende.

**7.1.1.1 Opstilling af model 2.**

$$\overline{n} = 0,2963$$

$$SAK_n = 1 \cdot (3 \cdot 5 - 1) \cdot 0,07059^2 = 0,06976$$

$$SAK_{\text{punkter}} = (3 \cdot 5 - 1) \cdot \frac{6,978^2}{1} = 681,7$$

$$SAK_{\text{total}} = SAK_0 + SAK_{\text{punkter}} = 0 + 681,7 = 681,7$$

$$SAP_{n,Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{1} = 0,06976 \cdot \frac{-20,52}{1} = -1,431$$

Bedste estimat a for  $\alpha$  er:

$$a = 22,89$$

$$\overline{c/v} = 1,9539$$

$$SAK_{c/v} = 1 \cdot (3 \cdot 5 - 1) \cdot 0,5601^2 = 4,392$$

$$SAP_{c/v,Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{n} = 4,392 \cdot \frac{11,89}{1} = 52,20$$

$$SAP_{n,c/v} = 0, \text{ da forsøget er fuldstændigt balanceret.}$$

Herefter bestemmes de bedste estimater  $b_1$ ,  $b_2$  for  $\beta_1$  og  $\beta_2$ .

$$\begin{aligned} b_1 \cdot 0,06976 + b_2 \cdot (0) &= -1,431 \\ b_1 \cdot (0) + b_2 \cdot 4,392 &= 52,20 \end{aligned}$$

⇓

$$b_1 = -20,51 \quad b_2 = 11,89$$

Den estimerede lineære regressionsmodel 2 for brudstyrken, afhængig af  $n$  og  $c/v$  - forholdet, bliver herefter:

$$Y_{\text{est. brudstyrke}} = 22,89 + (-20,51) \cdot (n - 0,296) + 11,89 \cdot (c/v - 1,954)$$

⇕

$$Y_{\text{est. brudstyrke}} = 5,73 - 20,51 \cdot n + 11,89 \cdot c/v$$

Da man, som tidligere beskrevet, ikke kan teste, om den estimerede lineære regressionsmodel kan antages at passe, foretages i stedet en grafisk vurdering af spørgsmålet.

Først optegnes residualerne  $r = Y_{\text{realiseret brudstyrke}} - Y_{\text{est. brudstyrke}}$  mod  $Y_{\text{est. brudstyrke}}$  i et retvinklet koordinatsystem.

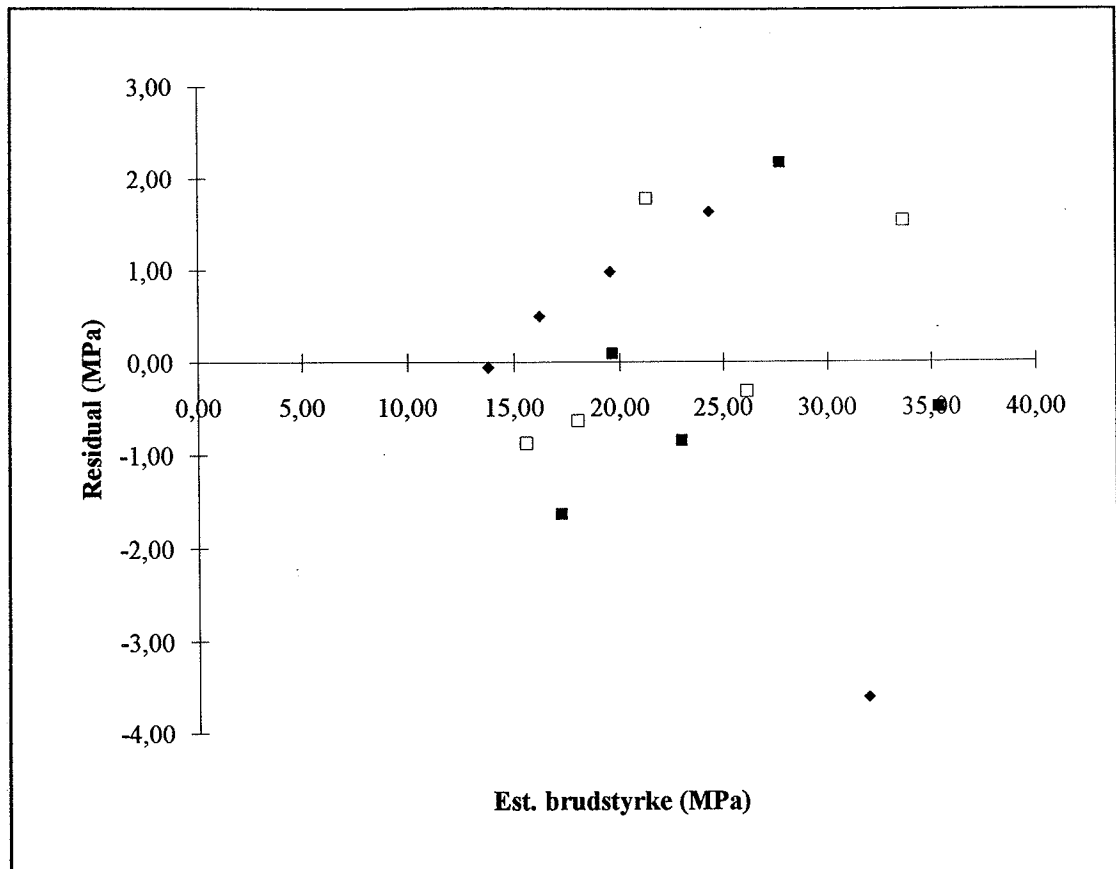
Hvis regressionsmodellen kan antages at passe, skal residualerne,  $r$ , fordele sig tilfældigt omkring x-aksen.

Residualerne beregnes og resultaterne er præsenteret i tabel 6.4.

|   |       | c/v               |                  |       |                   |                  |       |                   |                  |       |                   |                  |       |                   |                  |       |
|---|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|
|   |       | 1 / 0,35          |                  |       | 1 / 0,45          |                  |       | 1 / 0,55          |                  |       | 1 / 0,65          |                  |       | 1 / 0,75          |                  |       |
|   |       | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$   | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$   | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$   | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$   | $Y_{\text{real}}$ | $Y_{\text{est}}$ | $r$   |
| n | 0,214 | 34,82             | 35,31            | -0,49 | 29,93             | 27,76            | 2,16  | 22,11             | 22,96            | -0,85 | 19,72             | 19,63            | 0,09  | 15,57             | 17,19            | -1,63 |
|   | 0,294 | 35,20             | 33,67            | 1,53  | 25,81             | 26,12            | -0,31 | 23,09             | 21,32            | 1,77  | 17,36             | 17,99            | -0,64 | 14,68             | 15,55            | -0,88 |
|   | 0,381 | 28,27             | 31,89            | -3,61 | 25,96             | 24,34            | 1,62  | 20,51             | 19,53            | 0,98  | 16,63             | 16,21            | 0,49  | 13,71             | 13,77            | -0,06 |

Tabel 6.4 Beregnede residualerne  $r = Y_{\text{realiseret brudstyrke}} - Y_{\text{est. brudstyrke}}$  for forsøg, der er gennemført for beton med Liapor 5 som groft tilslag.

Desuden er resultaterne vist i figur 6.10 for at give et bedre vurdering over, om model 2 kan antages at passe som modelbeskrivelse for brudstyrkeresultaterne.



Figur 6.10 Residualer for den beskrevne model for beton med Liapor 5 som funktion af estimeret brudstyrke i MPa.

Da residual-punkterne, som det fremgår af figur 6.10, tilsyneladende fordeler sig rimeligt tilfældigt omkring x-aksen, antages den estimerede lineære regressionsmodel 2 at kunne beskrive den forventede brudstyrke.

#### 7.1.1.2 Hypotesetestninger på regressionsmodel 2.

Da regressionsmodel 2 kan antages at gælde, foretages herefter hypotesetestning af b-værdiernes størrelse, ( $b_1$  og  $b_2$ ).

$$SAK_{\text{reg model 2}} = -20,51 \cdot (-1,431) + 11,89 \cdot (52,20) = 650,0$$

$$SAK_{\text{res model 2}} = 681,7 - 650,0 = 31,7$$

$$SAK_{\text{reg model 1}} = \frac{(-1,431)^2}{0,06976} = 29,35$$

$$SAK_{\text{res model 1}} = 681,7 - 29,35 = 652,3$$

$$SAK_{\text{model 1}} = 652,3 - 31,7 = 620,6$$

Variansanalysetabel med resultater for nedenstående hypotesetestning angivet i kolonne F.

| Variation                           | SAK   | f  | s <sup>2</sup> | F                                         |
|-------------------------------------|-------|----|----------------|-------------------------------------------|
| Regres model 1                      | 29,35 | 1  |                |                                           |
| Residual model 1 - residual model 2 | 620,6 | 1  | 620,6          | 235*** (F <sub>model 1</sub> )            |
| Residual model 2                    | 31,7  | 12 | 2,64           | --- (F <sub>Model 2</sub> ) <sup>1)</sup> |
| Gentagelse                          | 0     | 0  | ---            | ---                                       |
| Total                               | 681,7 | 14 |                |                                           |

<sup>1)</sup> NB: Model 2 kan ikke testes, da SAK<sub>0</sub> = 0.

Tabel 6.5 Variansanalysetabel for forsøg med let konstruktionsbeton, som er fremstillet med Liapor 5.

### 7.1.1.3 Testning af om brudstyrken kan antages at være uafhængig af cement/vand-forholdet, c/v.

Herefter foretages en hypotesetestning af

$$H_0 : b_2 = 0 \quad \text{mod } H: b_2 \neq 0$$

Dvs. en testning af, om den forenklede regressionsmodel 1, som er angivet i efterfølgende ligning, kan antages at gælde, således at brudstyrken kan antages kun at afhænge af volumenandelen tilslag, n, og at være uafhængig af cement/vand-forholdet.

$$\text{Model 1:} \quad Y_{\text{est. brudstyrke}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n-n)$$

Tester  $H_0 : b_2 = 0$  mod  $H: b_2 \neq 0$

$$F_{\text{model 1}} > F_{0,95}(1,12) = 4,75 ?$$

$$> F_{0,99}(1,12) = 9,33?$$

$$> F_{0,999}(1,12) = 18,6?$$

Ja, da  $F_{\text{model 0}}$  er større end 4,75 er der en stjerne (\*) signifikans mod  $H_0$ .

Da  $F_{\text{model 0}}$  også er større end 9,33 er der \*\* signifikans mod  $H_0$ .

Da  $F_{\text{model 0}}$  ligeledes er større end 18,6 er der opnået \*\*\* signifikans mod  $H_0$ .

D.v.s. at der forekommer \*\*\* signifikans mod  $H_0$ . Brudstyrken kan altså antages både at afhænge af n og c/v-forholdet.

### 7.1.2 Konklusion

Som det fremgår af ovenstående, kan det antages, at den estimerede brudstyrke for beton med Liapor 5 tilslag, følger den matematiske model, der er angivet i følgende ligning (b.7.1)

$$Y_{\text{est. brudstyrke}} = 5,73 - 20,51 \cdot n + 11,89 \cdot c/v, \quad n \in [0,2 ; 0,4] \text{ og } c/v \in [1/0,35; 1/0,75] \quad (\text{b.7.1})$$

## 7.2 95% konfidensinterval for estimeret brudstyrke som funktion af n og c/v.

Herefter opstilles 95% konfidensinterval for gennemsnitlig brudstyrke,  $E(Y_{\text{Est. brudstyrke}} | n, c/v)$ , afhængig af n og c/v, der beregnes på grundlag af beregningsudtrykket, der er angivet i ligning b.7.2:

For beregningsudtrykkene, der ligger til grund for 95% konfidensintervallerne, henvises til beskrivelsen i bilag 11.

$$E(Y_{\text{Est. brudstyrke}} | n, c/v) =$$

$$[a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c - \bar{c}) - t_{0,975}(f_m) \cdot s_m \cdot K_2 ; a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c - \bar{c}) + t_{0,975}(f_m) \cdot s_m \cdot K_2] \quad (\text{b.7.2})$$

hvor  $t_{0,975}(12) = 2,18$  og  $s_m^2 = 2,64$ .

For beregning af værdien  $K_2$  beregnes værdien  $D_{n-c/v}$ .

$$D_{n-c/v} = 0,06976 \cdot 4,392 - 0 = 0,3064$$

hvorefter beregningsudtrykket for  $K_2$  lader sig opstille, som vist i ligning b.7.3.

$$K_2 = \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{0,06976 \cdot (c/v - 1,954)^2 + 4,392 \cdot (n - 0,296)^2 - 0}{0,3064}} \quad (\text{b.7.3})$$

Ligning b.7.3 medfører, at 95% konfidensintervallet kan beregnes som i henholdt til ligning b.7.4.

$$E(Y_{\text{Est. brudstyrke}} | n, c/v) =$$

$$\frac{[5,73 - 20,51 \cdot n + 11,89 \cdot c/v - 2,18 \cdot \sqrt{2,64} \cdot K_2 ; 5,73 - 20,51 \cdot n - 11,89 \cdot c/v + 2,18 \cdot \sqrt{2,64} \cdot K_2]}{2}$$

Lign. (b.7.5)

Eksempler på konfidensintervaller for det gennemsnitlige estimat på brudstyrken som funktion af n og c/v for let konstruktionsbeton, som er fremstillet med Liapor 5, er beregnet nedenfor:

|                              |                                 |
|------------------------------|---------------------------------|
| $n = 0,214$ , $c/v = 1/0,35$ | $\Rightarrow [33,2 ; 37,4]$ MPa |
| $n = 0,214$ , $c/v = 1/0,55$ | $\Rightarrow [21,5 ; 24,4]$ MPa |
| $n = 0,214$ , $c/v = 1/0,75$ | $\Rightarrow [13,6 ; 19,0]$ MPa |
| $n = 0,294$ , $c/v = 1/0,35$ | $\Rightarrow [31,9 ; 35,4]$ MPa |
| $n = 0,294$ , $c/v = 1/0,55$ | $\Rightarrow [20,4 ; 22,3]$ MPa |
| $n = 0,294$ , $c/v = 1/0,75$ | $\Rightarrow [14,2 ; 16,9]$ MPa |
| $n = 0,381$ , $c/v = 1/0,35$ | $\Rightarrow [29,8 ; 34,0]$ MPa |
| $n = 0,381$ , $c/v = 1/0,55$ | $\Rightarrow [18,1 ; 21,0]$ MPa |
| $n = 0,381$ , $c/v = 1/0,75$ | $\Rightarrow [12,0 ; 15,6]$ MPa |

## ANALYSE AF OPNÅEDE BETONBRUDSTYRKER FOR LET KONSTRUKTIONSBETON SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENT/VAND-FORHOLD, $c/v$ , TIL VURDERING GYLDIGHEDEN AF BOLOMEYS LOV

### 8.0 UNDERSØGELSE AF GYLDIGHEDEN AF BOLOMEYS LOV FOR EN BETON MED LECA 4/8 SOM GROFT TILSLAG.

De gennemsnitlige brudstyrkeresultater af 6 prøvecylindre for hvert valgt niveau af volumenandelen groft tilslag,  $n$ , og  $c/v$ -forholdet er vist i tabel 6.2. De enkelte brudstyrkeresultater for hver prøvecylinder er præsenteret i bilag 10.

|     |       | $c / v$  |          |          |          |          |
|-----|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
|     |       | 1 / 0,35 | 1 / 0,45 | 1 / 0,55 | 1 / 0,65 | 1 / 0,75 |
| $n$ | 0,216 | 24,99    | 18,96    | 16,49    | 11,12    | 10,21    |
|     | 0,300 | 20,13    | 15,36    | 12,88    | 10,18    | 9,09     |
|     | 0,375 | 18,83    | 16,50    | 11,72    | 9,88     | 8,38     |

Tabel 6.2. Gennemsnitlige 28-døgns brudstyrker i MPa for let konstruktionsbeton fremstillet med LECA 4/8.

#### 8.1 Statistisk analyse af resultaterne i tabel 6.2.

For at undersøge om Bolomeys lov gælder for let konstruktionsbeton, der fremstilles med LECA 4/8, foretages en dobbelt-regressionsanalyse til opstilling af en model for brudstyrkens afhængighed af  $n$  og  $c/v$ -forholdet.

Efter tilsvarende overvejelser omkring forudsætningerne for regressionsanalyse, som er foretaget i bilag 7 afsnit 7.1 vedr. beton med Liapor 5 foretages herefter den statistiske undersøgelse af forsøgsresultaterne.

For teorien, der ligger til grund for dobbelt regressionsanalyse, henvises til bilag 11.

##### 8.1.1 Vurdering af model 2: $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n}) + \beta_2 \cdot (c/v - \overline{c/v})$ , er gældende.

##### 8.1.1.1 Opstilling af model 2.

$$\bar{n} = 0,297$$

$$SAK_n = 1 \cdot (3 \cdot 5 - 1) \cdot 0,06723^2 = 0,06327$$

$$SAK_{\text{punkter}} = (3 \cdot 5 - 1) \cdot \frac{4,895^2}{1} = 335,5$$

$$SAK_{\text{total}} = SAK_0 + SAK_{\text{punkter}} = 0 + 335,5 = 335,5$$

$$SAP_{n \cdot Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{1} = 0,06327 \cdot \frac{-20,96}{1} = -1,3263$$

Bedste estimat a for  $\alpha$  er:

$$a = 14,31$$

$$\overline{c/v} = 1,9539$$

$$SAK_{c/v} = 1 \cdot (5 \cdot 3 - 1) \cdot 0,5601^2 = 4,392$$

$$SAP_{c/v \cdot Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{n} = 4,392 \cdot \frac{8,122}{1} = 35,67$$

$$SAP_{n \cdot c/v} = 0, \text{ da forsøget er fuldstændigt balanceret.}$$

Herefter bestemmes de bedste estimater  $b_1$ ,  $b_2$  for  $\beta_1$  og  $\beta_2$ .

$$b_1 \cdot 0,06327 + b_2 \cdot (0) = -1,3263$$

$$b_1 \cdot (0) + b_2 \cdot 4,392 = 35,67$$

⇓

$$b_1 = -20,96 \quad b_2 = 8,122$$

Den estimerede lineære regressionsmodel 2 for brudstyrken, som afhængig af  $n$  og  $c/v$  - forholdet, bliver herefter:

$$Y_{\text{est. brudstyrke}} = 14,31 + (-20,96) \cdot (n - 0,297) + 8,122 \cdot (c/v - 1,954)$$

⇕

$$Y_{\text{est. brudstyrke}} = 4,66 - 20,96 \cdot n + 8,122 \cdot c/v$$

Da man, som tidligere forklaret, ikke kan teste, om den estimerede lineære regressionsmodel kan antages at passe, foretages i stedet en grafisk vurdering af spørgsmålet.

Som for let konstruktionsbeton med Liapor 5 optegnes residualerne,  $r$ ,

$r = Y_{\text{realiseret brudstyrke}} - Y_{\text{est. brudstyrke}}$  mod  $Y_{\text{est. brudstyrke}}$  i et retvinklet koordinatsystem.

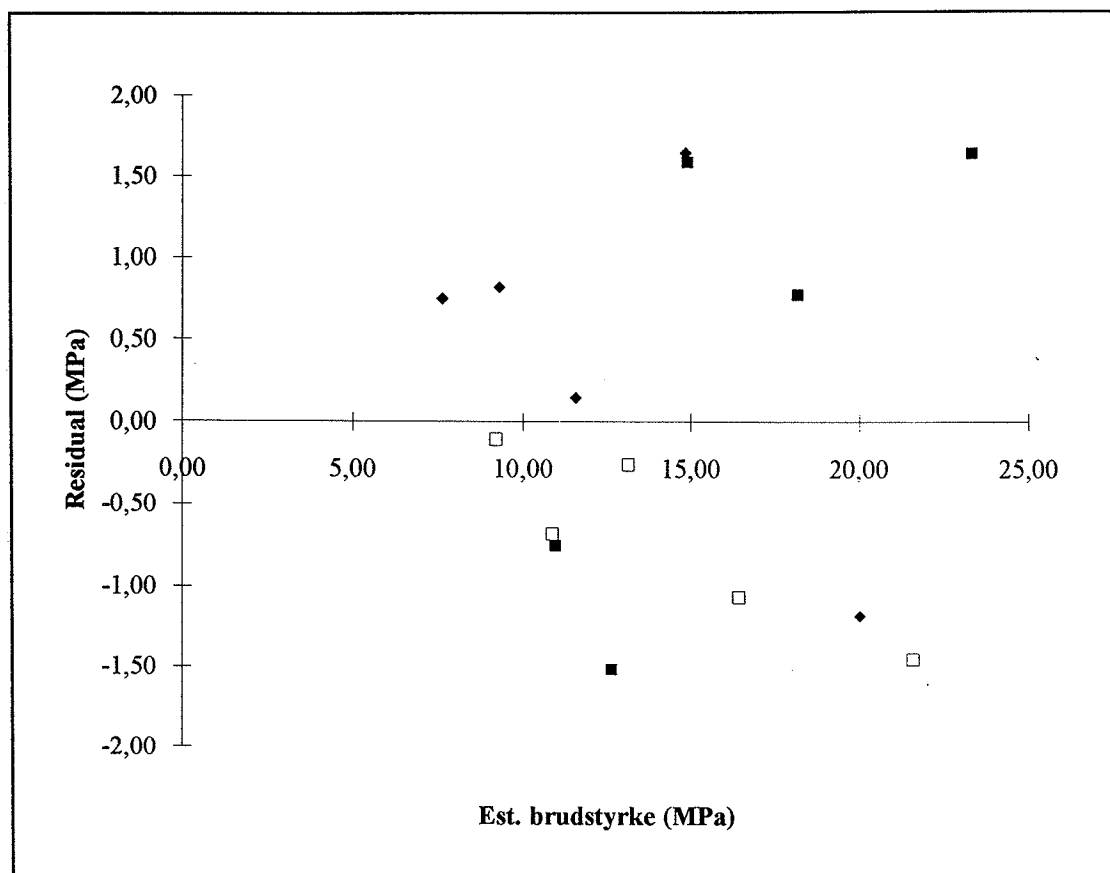
Hvis regressionsmodellen kan antages at passe, skal residualerne,  $r$ , fordele sig tilfældigt omkring x-aksen.

Residualerne beregnes og resultaterne er præsenteret i tabel 6.6:

|   |       | v/c               |                  |       |                   |                  |       |                   |                  |       |                   |                  |       |                   |                  |       |
|---|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|
|   |       | 0,35              |                  |       | 0,45              |                  |       | 0,55              |                  |       | 0,65              |                  |       | 0,75              |                  |       |
|   |       | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     |
| n | 0,216 | 24,99             | 23,34            | 1,65  | 18,96             | 18,18            | 0,78  | 16,49             | 14,90            | 1,59  | 11,12             | 12,63            | -1,51 | 10,21             | 10,96            | -0,75 |
|   | 0,300 | 20,13             | 21,58            | -1,45 | 15,36             | 16,42            | -1,07 | 12,88             | 13,14            | -0,26 | 10,18             | 10,87            | -0,68 | 9,09              | 9,20             | -0,11 |
|   | 0,375 | 18,83             | 20,01            | -1,18 | 16,50             | 14,85            | 1,65  | 11,72             | 11,57            | 0,15  | 10,11             | 9,30             | 0,82  | 8,38              | 7,63             | 0,75  |

Tabel 6.6 Beregnede residualer  $r = Y_{\text{realiseret brudstyrke}} - Y_{\text{est. brudstyrke}}$  for forsøg, der er gennemført med LECA 4/8 som groft tilslag.

Desuden er resultaterne vist i figur 6.11 for at give et bedre overblik over, om model 2 kan antages at passe som modelbeskrivelse for brudstyrkeresultaterne.



Figur 6.11 Residualer for den beskrevne model for beton med LECA 4/8 som funktion af estimeret brudstyrke i MPa.

Da residual-punkterne, som det fremgår af figur 6.11, tilsyneladende fordeler sig rimeligt tilfældigt omkring x-aksen, antages den estimerede lineære regressionsmodel 2 at kunne beskrive den forventede brudstyrke. Dog er alle residualer for  $n = 0,30$  negative, hvilket tyder på, at der ikke helt forekommer en lineær afhængighed af brudstyrke som funktion af volumenandelen tilslag,  $n$ . Der ses dog bort fra dette, da afvigelsen er minimal og skønnes at være tilfældig.

### 8.1.1.2 Hypotesetestninger på regressionsmodel 2.

Da regressionsmodel 2 kan antages at gælde, foretages en hypotesetestning af b-værdiernes størrelse, ( $b_1$  og  $b_2$ ).

$$SAK_{\text{reg model 2}} = -20,96 \cdot (-1,3263) + 8,122 \cdot (35,67) = 317,5$$

$$SAK_{\text{res model 2}} = 335,5 - 317,5 = 18,0$$

$$SAK_{\text{reg model 1}} = \frac{(-1,3263)^2}{0,06327} = 27,80$$

$$SAK_{\text{res model 1}} = 335,5 - 27,80 = 307,7$$

$$SAK_{\text{model 1}} = 307,7 - 18,0 = 289,7$$

Variansanalysetabel med resultater for nedenstående hypotesetestning angivet i kolonne F.

| Variation                           | SAK   | f  | s <sup>2</sup> | F                                          |
|-------------------------------------|-------|----|----------------|--------------------------------------------|
| Regres model 1                      | 27,80 | 1  |                |                                            |
| Residual model 1 - residual model 2 | 289,7 | 1  | 289,7          | 193***( $F_{\text{Model 1}}$ )             |
| Residual model 2                    | 18,0  | 12 | 1,50           | --- ( $F_{\text{Model 2}}$ ) <sup>1)</sup> |
| Gentagelse                          | 0     | 0  | ---            | ---                                        |
| Total                               | 335,5 | 14 |                |                                            |

<sup>1)</sup> Model 2 kan ikke testes, da  $SAK_0 = 0$ .

Tabel 6.7 Variansanalysetabel for forsøg med let konstruktionsbeton, som fremstilles med LECA 4/8.

### 8.1.1.3 Testning af om brudstyrken kan antages at være uafhængig af cement/vand-forholdet, c/v.

Herefter foretages en hypotesetestning af

$$H_0 : b_2 = 0 \quad \text{mod } H : b_2 \neq 0$$

Dvs. en testning om den forenklede regressionsmodel 1, kan antages at gælde, således at brudstyrken kan antages kun at afhænge af volumenandelen af tilslag,  $n$ , og at være uafhængig af cement/vand-forholdet.

$$\text{Model 1: } Y_{\text{est. brudstyrke}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n-n),$$

Tester  $H_0 : b_2 = 0$  mod  $H: b_2 \neq 0$

$$F_{\text{model } 1} > F_{0,95}(1,12) = 4,75?$$

$$> F_{0,99}(1,12) = 9,33?$$

$$> F_{0,999}(1,12) = 18,6?$$

Ja, da  $F_{\text{model } 0}$  er større end 4,75 er der en stjerne (\*) signifikans mod  $H_0$ .

Da  $F_{\text{model } 0}$  også er større end 9,33 er der \*\* signifikans mod  $H_0$ .

Da  $F_{\text{model } 0}$  ligeledes er større end 18,6 er der opnået \*\*\* signifikans mod  $H_0$ .

D.v.s. at der forekommer \*\*\*signifikans mod  $H_0$ . Brudstyrken kan altså antages både at afhænge af  $n$  og  $c/v$ -forholdet.

### 8.1.2 Konklusion

Som det fremgår af ovenstående, kan det antages, at den estimerede brudstyrke for beton med LECA 4/8 følger den matematiske model, der er angivet i følgende ligning (b.8.1).

$$Y_{\text{est. brudstyrke}} = 4,66 - 20,96 \cdot n + 8,122 \cdot c/v, \quad n \in [0,2 ; 0,4] \text{ og } c/v \in [1/0,35; 1/0,75] \quad (\text{b.8.1})$$

### 8.2 95% konfidensinterval for estimeret brudstyrke som funktion af $n$ og $c/v$ .

Herefter opstilles 95% konfidensinterval for gennemsnitlig brudstyrke,  $E(Y_{\text{Est. brudstyrke}} | n, c/v)$ , afhængig af  $n$  og  $c/v$ , der beregnes på grundlag af beregningsudtrykket der er angivet i ligning b.8.2:

For beregningsudtrykkene, der ligger til grund for 95% konfidensintervallerne, henvises til beskrivelsen i bilag 11.

$$E(Y_{\text{Est. brudstyrke}} | n, c/v) =$$

$$[a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c/v - \bar{c}) - t_{0,975} \cdot (f_m) \cdot s_m \cdot K_2 ; a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c/v - \bar{c}) + t_{0,975} \cdot (f_m) \cdot s_m \cdot K_2] \quad (\text{b.8.2})$$

$$\text{hvor } t_{0,975}(12) = 2,18 \text{ og } s_{m1}^2 = 3,58.$$

For beregning af værdien  $K_2$  beregnes værdien  $D_{n,c/v}$ .

$$D_{n,c/v} = 0,06327 \cdot 4,392 - 0 = 0,2779$$

Herefter lader beregningsudtrykket for  $K_2$  lade sig opstille, som vist i ligning b.8.3.

$$K_2 = \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{0,06327 \cdot (c/v - 1,954)^2 + 4,392 \cdot (n - 0,297)^2 - 0}{0,2779}} \quad (\text{b.8.3})$$

Ligning b.8.3 medfører, at 95% konfidensintervallet kan beregnes i henhold til ligning b.8.4.

$$E(Y_{\text{Est. brudstyrke}} | n, c/v) =$$

$$[-0,9379 - 2,096 \cdot n + 8,122 \cdot c/v - 2,18 \cdot \sqrt{3,58} \cdot K_2 ; -0,9379 - 2,096 \cdot n + 8,122 \cdot c/v + 2,18 \cdot \sqrt{3,58} \cdot K_2] \quad (\text{b.8.4})$$

Eksempler på konfidensintervaller for det gennemsnitlige estimat på brudstyrken som funktion af n og c/v for det lette konstruktionsbeton, som er fremstillet med LECA 4/8, er beregnet nedenfor:

|                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| n = 0,216 , c/v = 1/0,35 | ⇒ [19,4 ; 24,3] MPa |
| n = 0,216 , c/v = 1/0,55 | ⇒ [11,7 ; 15,1] MPa |
| n = 0,216 , c/v = 1/0,75 | ⇒ [ 7,3 ; 11,5] MPa |
| n = 0,300 , c/v = 1/0,35 | ⇒ [19,5 ; 23,7] MPa |
| n = 0,300 , c/v = 1/0,55 | ⇒ [12,1 ; 14,3] MPa |
| n = 0,300 , c/v = 1/0,75 | ⇒ [ 7,6 ; 10,9] MPa |
| n = 0,375 , c/v = 1/0,35 | ⇒ [19,0 ; 23,9] MPa |
| n = 0,375 , c/v = 1/0,55 | ⇒ [18,1 ; 21,0] MPa |
| n = 0,375 , c/v = 1/0,75 | ⇒ [11,4 ; 14,7] MPa |

## Bilag 9

### ANALYSE AF OPNÅEDE BETONBRUDSTYRKER FOR LET KONSTRUKTIONSBETON SOM FUNKTION AF VOLUMENANDEL TILSLAG, $n$ , OG CEMENT/VAND-FORHOLD, $c/v$ , TIL VURDERING GYLDIGHEDEN AF BOLOMEYS LOV

#### 9.0 UNDERSØGELSE AF GYLDIGHEDEN AF BOLOMEYS LOV FOR LET KONSTRUKTIONSBETON MED LECA T SOM GROFT TILSLAG.

De gennemsnitlige brudstyrkeresultater af 6 prøvecylindre for hvert valgt niveau af volumenandelen groft tilslag,  $n$ , og  $c/v$ -forholdet er vist i tabel 6.3. De enkelte brudstyrkeresultater for hver prøvecylinder er præsenteret i bilag 10.

|     |       | $c / v$  |          |          |          |          |
|-----|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
|     |       | 1 / 0,35 | 1 / 0,45 | 1 / 0,55 | 1 / 0,65 | 1 / 0,75 |
| $n$ | 0,213 | 34,35    | 24,64    | 20,63    | 17,02    | 13,09    |
|     | 0,299 | 28,99    | 23,47    | 18,71    | 15,07    | 12,87    |
|     | 0,375 | 22,67    | 20,22    | 16,40    | 13,41    | 11,98    |

Tabel 6.3. Gennemsnitlige 28-døgns brudstyrker, MPa, for let konstruktionsbeton fremstillet med LECA T.

#### 9.1 Statistisk analyse af resultaterne i tabel 6.3.

For at undersøge om Bolomeys lov gælder for let konstruktionsbeton, som fremstilles med LECA T, foretages en dobbelt-regressionsanalyse til opstilling af en model for brudstyrkens afhængighed af  $n$  og  $c/v$ -forholdet.

Efter tilsvarende overvejelser omkring forudsætningerne for regressionsanalyse, som er foretaget i bilag 7 afsnit 7.1 vedr. Liapor 5, foretages herefter den statistiske undersøgelse af forsøgsresultaterne.

For teorien, der ligger til grund for dobbelt regressionsanalyse, henvises til bilag 11.

##### 9.1.1 Vurdering af model 2: $Y_{\text{est. vandbehov}} = \alpha + \beta_1 \cdot (\overline{n-n}) + \beta_2 \cdot (\overline{c/v-c/v})$ , er gældende.

##### 9.1.1.1 Opstilling af model 2.

$$\overline{n} = 0,2957$$

$$SAK_n = 1 \cdot (3 \cdot 5 - 1) \cdot 0,06850^2 = 0,06569$$

$$SAK_{\text{punkter}} = (3 \cdot 5 - 1) \cdot \frac{6,4322^2}{1} = 579,2$$

$$SAK_{\text{total}} = SAK_0 + SAK_{\text{punkter}} = 0 + 579,2 = 579,2$$

$$SAP_{n \cdot Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{1} = 0,06569 \cdot \frac{-30,79}{1} = -2,023$$

Bedste estimat a for  $\alpha$  er:

$$a = 19,57$$

$$\overline{c/v} = 1,954$$

$$SAK_{c/v} = 1 \cdot (5 \cdot 3 - 1) \cdot 0,5601^2 = 4,392$$

$$SAP_{c/v \cdot Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer}}}{n} = 4,392 \cdot \frac{10,478}{1} = 46,02$$

$$SAP_{n \cdot c/v} = 0, \text{ da forsøget er fuldstændigt balanceret.}$$

Herefter bestemmes de bedste estimater  $b_1$ ,  $b_2$  for  $\beta_1$  og  $\beta_2$ .

$$\begin{aligned} b_1 \cdot 0,06569 + b_2 \cdot (0) &= -2,023 \\ b_1 \cdot (0) + b_2 \cdot 4,392 &= 46,02 \end{aligned}$$

⇓

$$b_1 = -30,79 \quad b_2 = 10,45$$

Den estimerede lineære regressionsmodel 2 for brudstyrken, afhængig af  $n$  og  $c/v$ -forholdet, bliver herefter:

$$Y_{\text{est. brudstyrke}} = 19,57 + (-30,79) \cdot (n - 0,2957) + 10,48 \cdot (c/v - 1,954)$$

⇕

$$Y_{\text{est. brudstyrke}} = 8,20 - 30,79 \cdot n + 10,48 \cdot c/v$$

Herefter foretages, ligesom for betoner med de øvrige tilslagsmaterialer, en grafisk vurdering af spørgsmålet om den estimerede lineære regressionsmodel kan antages at passe til de opnåede brudstyrkedata.

Først optegnes residualerne  $r = Y_{\text{realiseret brudstyrke}} - Y_{\text{est. brudstyrke}}$  mod  $Y_{\text{est. brudstyrke}}$  i et retvinklet koordinatsystem.

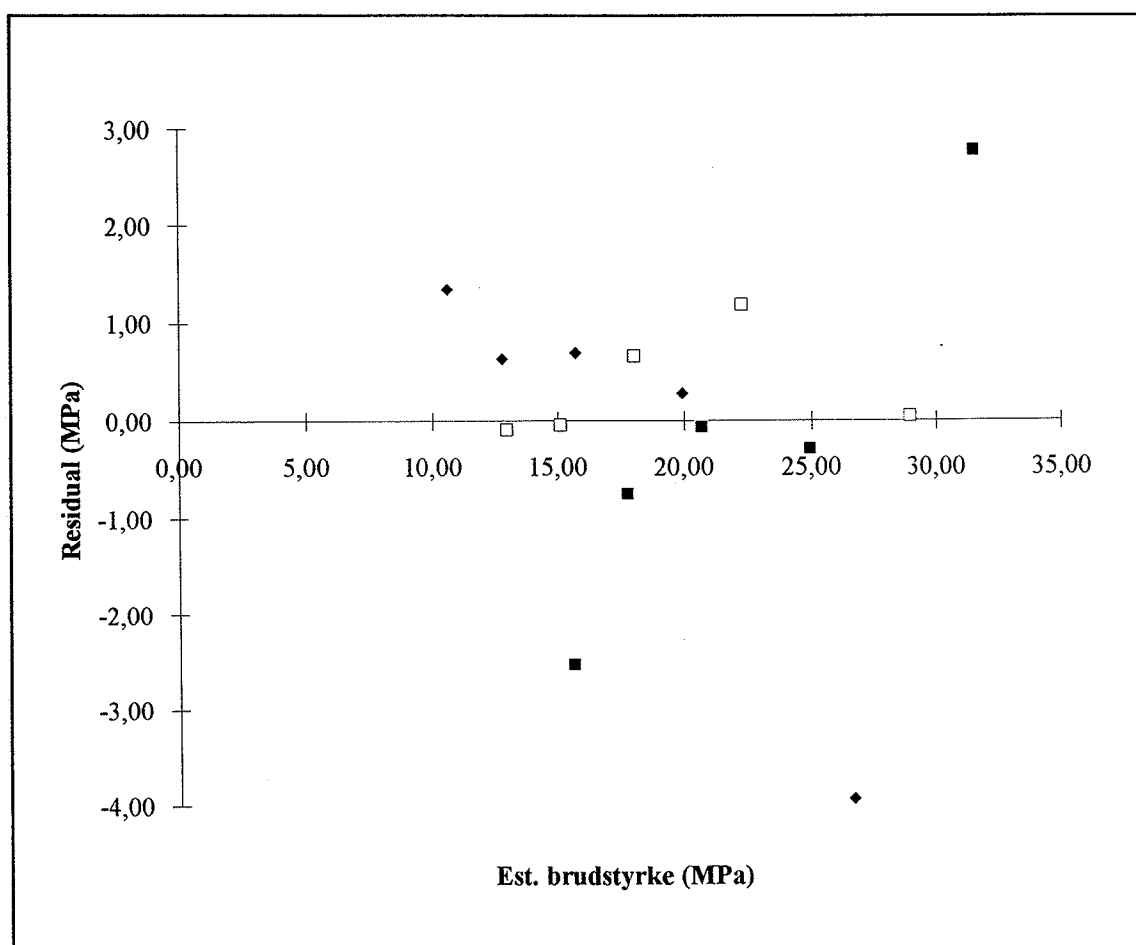
Hvis regressionsmodellen skal kunne antages at passe, skal residualerne,  $r$ , fordele sig tilfældigt omkring x-aksen i diagrammet.

Residualerne beregnes og resultaterne er præsenteret i tabel 6.8:

|   |       | c/v               |                  |       |                   |                  |       |                   |                  |       |                   |                  |       |                   |                  |       |
|---|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|-------|
|   |       | 1 / 0,35          |                  |       | 1 / 0,45          |                  |       | 1 / 0,55          |                  |       | 1 / 0,65          |                  |       | 1 / 0,75          |                  |       |
|   |       | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     | Y <sub>real</sub> | Y <sub>est</sub> | r     |
| n | 0,213 | 34,35             | 31,58            | 2,76  | 24,64             | 24,93            | -0,29 | 20,63             | 20,70            | -0,07 | 17,02             | 17,76            | -0,75 | 13,09             | 15,62            | -2,53 |
|   | 0,299 | 28,99             | 28,94            | 0,05  | 23,47             | 22,28            | 1,19  | 18,71             | 18,05            | 0,66  | 15,07             | 15,12            | -0,04 | 12,87             | 12,97            | -0,10 |
|   | 0,375 | 22,67             | 26,60            | -3,93 | 20,22             | 19,94            | 0,28  | 16,40             | 15,71            | 0,69  | 13,41             | 12,78            | 0,64  | 11,98             | 10,63            | 1,35  |

Tabel 6.8 Beregnede residualer  $r = Y_{\text{realiseret brudstyrke}} - Y_{\text{est. brudstyrke}}$  for forsøg gennemført for beton med LECA T som groft tilslag.

Desuden er resultaterne vist i figur 6.12 for at gøre det muligt at foretage en bedre vurdering af, om model 2 kan antages at passe som modelbeskrivelse for brudstyrkeresultaterne.



Figur 6.12 Residualer for den beskrevne model som funktion af estimeret brudstyrke, MPa.

Da residual-punkterne, som det fremgår af figur 6.12, fordeler sig rimeligt tilfældigt omkring x-aksen, antages den estimerede lineære regressionsmodel 2 at give en tilfredsstillende beskrivelse af den forventede brudstyrke.

### 9.1.1.2 Hypotesetestninger på regressionsmodel 2.

Da regressionsmodel 2 kan antages at gælde, foretages herefter en hypotesetestning af b-værdiernes størrelse, ( $b_1$  og  $b_2$ ).

$$SAK_{\text{reg. model 2}} = -30,79 \cdot (-2,023) + 10,48 \cdot (46,02) = 544,5$$

$$SAK_{\text{res. model 2}} = 579,2 - 544,5 = 34,7$$

$$SAK_{\text{reg. model 1}} = \frac{(-2,023)^2}{0,06569} = 62,28$$

$$SAK_{\text{res. model 1}} = 579,2 - 62,28 = 516,9$$

$$SAK_{\text{model 1}} = 516,9 - 34,7 = 482,2$$

Variansanalysetabel med resultater for nedenstående hypotesetestning angivet i kolonne F.

| Variation                           | SAK   | f  | $s^2$ | F                                          |
|-------------------------------------|-------|----|-------|--------------------------------------------|
| Regres model 1                      | 62,28 | 1  |       |                                            |
| Residual model 1 - residual model 2 | 482,2 | 1  | 482,2 | 166***( $F_{\text{model 1}}$ )             |
| Residual model 2                    | 34,7  | 12 | 2,892 | --- ( $F_{\text{model 2}}$ ) <sup>1)</sup> |
| Gentagelse                          | 0     | 0  | ---   | ---                                        |
| Total                               | 579,2 | 14 |       |                                            |

<sup>1)</sup> Model 2 kan ikke testes, da  $SAK_0 = 0$ .

Tabel 6.9 Resulterende variansanalysetabel for forsøg med lette konstruktionsbeton med LECA T.

### 9.1.1.3 Testning af om brudstyrken kan antages at være uafhængig af cement/vand-indholdet.

Herefter foretages der en hypotesetestning om

$$H_0 : b_2 = 0 \quad \text{mod } H: b_2 \neq 0$$

Dvs. en testning om den forenklede regressionsmodel 1, kan antages at gælde, således at brudstyrken kan antages kun at afhænge af volumenandelen af tilslag,  $n$ , og at være uafhængig af cementindholdet,  $c$ .

$$\text{Model 1: } Y_{\text{est. brudstyrke}} = \alpha + \beta_1 \cdot (n - \bar{n})$$

Tester  $H_0 : b_2 = 0$  mod  $H: b_2 \neq 0$

$$F_{\text{model } 1} > F_{0,95}(1,12) = 4,75?$$

$$> F_{0,99}(1,12) = 9,33?$$

$$> F_{0,999}(1,12) = 18,6?$$

Ja, da  $F_{\text{model } 0}$  er større end 4,75 er der en stjerne (\*) signifikans mod  $H_0$ .

Da  $F_{\text{model } 0}$  også er større end 9,33 er der \*\* signifikans mod  $H_0$ .

Da  $F_{\text{model } 0}$  ligeledes er større end 18,6 er der opnået \*\*\* signifikans mod  $H_0$ .

D.v.s. at der forekommer \*\*\* signifikans mod  $H_0$ . Brudstyrken kan altså antages både at afhænge af  $n$  og  $c/v$ -tallet.

### 9.1.2 Konklusion.

Som det fremgår af ovenstående kan det antages, at den estimeret brudstyrke for beton med LECA T følger den matematiske model, der er angivet i følgende ligning (b.9.1).

$$Y_{\text{est. brudstyrke}} = 8,20 - 30,79 \cdot n + 10,48 \cdot c/v, \quad n \in [0,2 ; 0,4] \text{ og } c/v \in [1/0,35 ; 1/0,75] \quad (\text{b.9.1})$$

### 9.2 95% konfidensinterval for estimeret brudstyrke som funktion af $n$ og $c/v$ .

Herefter opstilles 95% konfidensinterval for gennemsnitlig brudstyrke,  $E(Y_{\text{Est. brudstyrke}} | n, c/v)$ , afhængig af  $n$  og  $c/v$ , der beregnes på grundlag af beregningsudtrykket, der er angivet i ligning b.9.2:

For beregningsudtrykkene der ligger til grund for 95% konfidensintervallerne henvises til beskrivelsen i bilag x.

$$E(Y_{\text{Est. brudstyrke}} | n, c/v) =$$

$$[a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c/v - \bar{c}) - t_{0,975}(f_m) \cdot s_m \cdot K_2 ; a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c/v - \bar{c}) + t_{0,975}(f_m) \cdot s_m \cdot K_2] \quad (\text{b.9.2})$$

hvor  $t_{0,975}(12) = 2,18$  og  $s_{m1}^2 = 2,892$ .

For beregning af værdien  $K_2$  beregnes værdien  $D_{n \cdot c/v}$ .

$$D_{n \cdot c/v} = 0,06569 \cdot 4,392 - 0 = 0,2885$$

Herefter lader beregningsudtrykket for  $K_2$ , sig vist i ligning b.9.4.

$$K_2 = \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{0,06569 \cdot (c/v - 1,954)^2 + 4,392 \cdot (n - 0,2957)^2 - 0}{0,2885}} \quad (\text{b.9.4})$$

Ligning b.9.4 medfører, at 95% konfidensintervallet kan beregnes i henhold til ligning b.9.5.

$$E(Y_{\text{Est. brudstyrke}} | n, c/v) =$$

$$[8,20 - 30,79 \cdot n + 10,48 \cdot c/v - 2,18 \cdot \sqrt{2,892} \cdot K_2 ; 8,20 - 30,79 \cdot n + 10,48 \cdot c/v + 2,18 \cdot \sqrt{2,892} \cdot K_2]$$

lign. (b.9.6)

Eksempler på konfidensintervaller for gennemsnitlig estimat på brudstyrken som funktion af  $n$  og  $c/v$  for let konstruktionsbeton, som er fremstillet med LECA T, er beregnet nedenfor:

$$n = 0,213, c/v = 1/0,35 \Rightarrow [29,4 ; 33,8] \text{ MPa}$$

$$n = 0,213, c/v = 1/0,55 \Rightarrow [19,1 ; 22,2] \text{ MPa}$$

$$n = 0,213, c/v = 1/0,75 \Rightarrow [13,7 ; 17,5] \text{ MPa}$$

$$n = 0,299, c/v = 1/0,35 \Rightarrow [27,1 ; 30,8] \text{ MPa}$$

$$n = 0,299, c/v = 1/0,55 \Rightarrow [17,1 ; 19,0] \text{ MPa}$$

$$n = 0,299, c/v = 1/0,75 \Rightarrow [10,5 ; 14,4] \text{ MPa}$$

$$n = 0,375, c/v = 1/0,35 \Rightarrow [24,4 ; 28,8] \text{ MPa}$$

$$n = 0,375, c/v = 1/0,55 \Rightarrow [14,2 ; 17,2] \text{ MPa}$$

$$n = 0,375, c/v = 1/0,75 \Rightarrow [8,8 ; 12,5] \text{ MPa}$$

## Tilslagsstype: LIAPOR 5

Beregningsgrundlag  
Max. indstillet tryk 400 kN = 100%  
Trykareal cylinder r=0,05m 0,00785 m<sup>2</sup>

| w/c    | 0,33     |                  | 0,48     |                  | 0,55     |                  | 0,64     |                  | 0,75     |                  |
|--------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|
|        | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) |
| 0,214  | 72,29    | 36,82            | 53,45    | 27,22            | 41,13    | 20,95            | 43,60    | 22,21            | 29,13    | 14,84            |
|        | 70,25    | 35,78            | 61,89    | 31,52            | 43,69    | 22,25            | 40,45    | 20,60            | 29,07    | 14,81            |
|        | 66,83    | 34,04            | 60,39    | 30,76            | 42,41    | 21,60            | 36,29    | 18,48            | 31,33    | 15,96            |
|        | 67,24    | 34,25            | 58,05    | 29,56            | 44,07    | 22,44            | 36,39    | 18,53            | 29,93    | 15,24            |
|        | 70,65    | 35,98            | 60,03    | 30,57            | 46,01    | 23,43            | 40,06    | 20,40            | 32,09    | 16,34            |
| 0,2204 | 62,97    | 32,07            | 58,77    | 29,93            | 43,17    | 21,95            | 35,51    | 18,06            | 31,86    | 16,23            |
|        |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |
|        |          | 1,72             |          | 1,49             |          | 0,84             |          | 1,61             |          | 0,69             |
|        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |
|        |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
| 0,231  | 67,61    | 34,43            | 55,63    | 28,33            | 44,27    | 22,55            | 33,08    | 16,85            | 27,91    | 14,21            |
|        | 69,14    | 35,21            | 45,68    | 23,26            | 48,02    | 24,46            | 35,31    | 17,98            | 28,35    | 14,44            |
|        | 72,27    | 36,81            | 43,93    | 22,37            | 43,61    | 22,21            | 35,76    | 18,23            | 30,35    | 15,46            |
|        | 64,61    | 32,91            | 52,23    | 26,60            | 45,39    | 23,12            | 33,71    | 17,17            | 28,19    | 14,36            |
|        | 70,65    | 35,98            | 51,49    | 26,32            | 45,27    | 23,06            | 33,81    | 17,22            | 28,49    | 14,51            |
| 0,231  | 70,37    | 35,84            | 55,11    | 28,07            | 45,47    | 23,16            | 32,79    | 16,70            | 29,61    | 15,08            |
|        |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |
|        |          | 1,38             |          | 2,47             |          | 0,77             |          | 0,61             |          | 0,48             |
|        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |
|        |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
| 0,231  | 48,49    | 24,70            | 51,70    | 26,33            | 39,17    | 19,95            | 35,13    | 17,89            | 25,71    | 13,69            |
|        | 54,07    | 27,54            | 50,37    | 25,65            | 39,74    | 20,24            | 32,31    | 16,46            | 27,83    | 14,17            |
|        | 46,57    | 23,72            | 49,07    | 24,99            | 39,45    | 20,09            | 33,22    | 16,92            | 29,66    | 15,11            |
|        | 57,43    | 29,25            | 51,09    | 26,02            | 40,07    | 20,41            | 33,21    | 16,91            | 27,35    | 13,93            |
|        | 63,61    | 32,40            | 52,81    | 26,90            | 40,91    | 20,84            | 29,27    | 14,91            | 26,01    | 13,25            |
| 0,231  | 62,93    | 32,05            | 50,79    | 25,87            | 42,31    | 21,55            | 32,79    | 16,70            | 24,99    | 12,75            |
|        |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |
|        |          | 2,27             |          | 2,56             |          | 0,59             |          | 0,98             |          | 0,87             |
|        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |
|        |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |

Tilslagsstype: LECA 4/8

Beregningsgrundlag:  
Max. indstillet tryk  
Trykareal cylinder r=0,05m

200 kN = 100%  
0,00785 m²

| n     | 0,25     |                  | 0,35     |                  | 0,45     |                  | 0,55     |                  | 0,65     |                  | 0,75     |                  |
|-------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|
|       | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) |
| 0,216 | 93,22    | 21,74            | 72,63    | 18,50            | 62,71    | 15,97            | 41,35    | 10,53            | 39,82    | 10,14            | 9,68     | 9,68             |
|       | 96,74    | 24,63            | 70,63    | 17,99            | 64,33    | 16,38            | 43,09    | 10,97            | 38,03    | 10,10            | 9,68     | 9,68             |
|       | 98,18    | 25,00            | 72,09    | 18,36            | 61,49    | 15,66            | 42,62    | 10,85            | 39,65    | 10,10            | 9,68     | 9,68             |
|       | 110,42   | 28,12            | 78,57    | 20,01            | 66,76    | 17,00            | 45,46    | 11,58            | 39,95    | 10,17            | 9,68     | 9,68             |
|       | 100,18   | 25,51            | 74,63    | 19,00            | 64,88    | 16,52            | 43,64    | 11,11            | 40,95    | 10,48            | 9,68     | 9,68             |
| 0,370 | 90,10    | 22,94            | 78,15    | 19,90            | 68,47    | 17,44            | 45,74    | 11,65            | 42,17    | 10,74            | 9,68     | 9,68             |
|       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |
|       |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
|       |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
|       |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
| 0,375 | 75,56    | 19,24            | 54,54    | 13,89            | 51,26    | 13,05            | 37,75    | 9,61             | 36,37    | 9,26             | 9,05     | 9,05             |
|       | 84,99    | 21,64            | 57,42    | 14,62            | 52,42    | 13,35            | 40,09    | 10,21            | 35,54    | 9,05             | 9,05     | 9,05             |
|       | 76,42    | 19,46            | 63,58    | 16,19            | 52,18    | 13,29            | 40,82    | 10,39            | 35,60    | 9,07             | 9,07     | 9,07             |
|       | 77,96    | 19,85            | 67,74    | 17,25            | 49,68    | 12,65            | 41,87    | 10,66            | 33,23    | 8,46             | 8,46     | 8,46             |
|       | 68,89    | 17,34            | 52,86    | 13,45            | 48,52    | 12,36            | 40,67    | 10,36            | 36,65    | 9,33             | 9,33     | 9,33             |
| 0,375 | 90,46    | 23,04            | 65,66    | 15,72            | 49,46    | 12,59            | 38,77    | 9,87             | 36,88    | 9,39             | 9,39     | 9,39             |
|       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |
|       |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
|       |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
|       |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
| 0,375 | 75,43    | 19,21            | 64,89    | 16,52            | 46,62    | 11,87            | 39,16    | 9,97             | 30,97    | 7,89             | 7,89     | 7,89             |
|       | 66,81    | 17,01            | 65,43    | 16,66            | 43,31    | 11,03            | 37,02    | 9,43             | 33,00    | 8,40             | 8,40     | 8,40             |
|       | 72,90    | 18,56            | 67,05    | 17,07            | 46,17    | 11,76            | 39,86    | 10,15            | 32,91    | 8,38             | 8,38     | 8,38             |
|       | 77,15    | 19,68            | 67,59    | 17,21            | 47,59    | 12,12            | 39,22    | 9,99             | 32,01    | 8,15             | 8,15     | 8,15             |
|       | 75,46    | 19,22            | 61,26    | 15,60            | 45,11    | 11,49            | 37,80    | 9,63             | 35,63    | 9,07             | 9,07     | 9,07             |
| 0,375 | 75,85    | 19,32            | 62,62    | 15,95            | 47,24    | 12,03            | 39,72    | 10,11            | 32,94    | 8,39             | 8,39     | 8,39             |
|       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |
|       |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
|       |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |
|       |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |          |                  |

Tilslagsstype: LECA T

Beregningsgrundlag  
Max. indstillet tryk 400 kN = 100%  
Trykareal cylinder r=0,05m 0,00785 m<sup>2</sup>

| Tryk (%) | 0,35     |                  | 0,45     |                  | 0,55     |                  | 0,65     |                  | 0,75     |                  |
|----------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|
|          | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) | Tryk (%) | Trykstyrke (MPa) |
| 0,216    | 64,55    | 32,88            | 46,75    | 23,81            | 40,91    | 20,34            | 34,09    | 17,16            | 26,21    | 13,35            |
|          | 68,12    | 34,69            | 47,77    | 24,33            | 40,97    | 20,87            | 32,33    | 16,47            | 24,99    | 12,73            |
|          | 66,74    | 33,99            | 47,65    | 24,27            | 42,91    | 21,85            | 32,82    | 16,70            | 25,20    | 12,83            |
|          | 67,27    | 34,26            | 50,51    | 25,72            | 38,95    | 19,84            | 33,58    | 17,16            | 26,15    | 13,32            |
|          | 66,62    | 33,93            | 48,45    | 24,68            | 38,65    | 19,68            | 33,09    | 16,85            | 26,61    | 13,55            |
|          | 71,37    | 36,35            | 49,15    | 25,03            | 40,63    | 20,69            | 34,58    | 17,61            | 25,03    | 12,75            |
| 0,339    |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |
|          |          | 1,15             |          | 0,67             |          | 0,79             |          | 0,42             |          | 0,36             |
|          |          |                  |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |
|          | 58,45    | 29,77            | 44,09    | 22,45            | 36,10    | 18,39            | 29,39    | 14,97            | 26,25    | 13,37            |
|          | 52,13    | 26,55            | 48,13    | 24,51            | 35,22    | 17,94            | 29,41    | 14,98            | 24,15    | 12,95            |
|          | 56,73    | 28,89            | 45,65    | 23,25            | 37,42    | 19,06            | 30,25    | 15,41            | 27,16    | 13,83            |
| 0,375    | 58,55    | 29,82            | 47,05    | 23,96            | 35,75    | 18,21            | 28,53    | 14,33            | 24,71    | 12,58            |
|          | 57,23    | 29,15            | 45,19    | 23,02            | 37,69    | 19,28            | 28,61    | 14,57            | 24,65    | 12,55            |
|          | 58,39    | 29,74            | 46,37    | 23,62            | 38,19    | 19,45            | 31,39    | 15,99            | 24,72    | 12,59            |
|          |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |
|          |          | 1,25             |          | 0,73             |          | 0,61             |          | 0,55             |          | 0,59             |
|          |          |                  |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |
| 0,375    | 37,96    | 19,33            | 38,27    | 19,49            | 32,60    | 16,60            | 25,33    | 12,90            | 22,74    | 11,58            |
|          | 44,01    | 22,41            | 40,75    | 20,75            | 31,65    | 16,12            | 26,71    | 13,60            | 23,62    | 12,03            |
|          | 44,66    | 22,75            | 36,93    | 18,81            | 31,54    | 16,06            | 27,24    | 13,87            | 24,92    | 12,69            |
|          | 46,85    | 23,86            | 43,37    | 22,09            | 33,43    | 17,03            | 25,59    | 13,03            | 23,66    | 12,05            |
|          | 46,83    | 23,85            | 38,87    | 19,80            | 32,58    | 16,59            | 26,87    | 13,68            | 23,17    | 11,80            |
|          | 46,73    | 23,80            | 40,07    | 20,41            | 31,41    | 16,00            | 26,27    | 13,38            | 22,97    | 11,76            |
|          |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |          | Gennemsnit       |
|          |          | 1,75             |          | 1,14             |          | 0,41             |          | 0,38             |          | 0,40             |
|          |          |                  |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |          | Spredning        |

### 11.0 STATISTIKKEN I FORBINDELSE MED DOBBELT REGRESSIONSANALYSE.

#### 11.1 Generelt

Følgende beskrivelse af dobbelt regressionsanalyse er refereret fra L. Brøndum og J. D. Monrad. Statistisk forsøgsplanlægning I. 2. rev. udgave 1979. Den private ingeniørfond, København 1979. Ref. [6]

Sidehenvisninger gives i teksten.

I en dobbelt regressionsanalyse indgår en rækkefaktor R og en søjlefaktor C med henholdsvis r niveauer ( $R_i$ ) og q niveauer ( $C_j$ ).

For nogle, evt. alle, kombinationer af række- og søjleniveauer foreligger observationer  $Y_{ij}$  af en bestemt kvantitativ egenskab (I dette projekt vandbehov og brudstyrker).

I den statistiske model forudsættes, at de variable  $Y_{ij}$  er statistisk uafhængige, normalfordelte variable med samme varians  $\sigma^2$ .

Den statistiske uafhængighed såvel mellem de gentagne observationer af hver enkelt variabel som mellem disse indbyrdes søges sikret ved en hensigtsmæssig forsøgsplan og -udførelse. Kravet vil eksempelvis være opfyldt såfremt den benyttede forsøgsplan er et fuldstændigt randomiseret forsøg.

I det følgende antages, at regressionen på den afhængige variabel Y på  $(x_1, x_2)$  er en lineær funktion, dvs. at man har følgende regressionsmodel på den estimerede middelværdi af Y

$$\text{Model 2: } E(Y|x_1, x_2) = \alpha_0 + \beta_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_1) + \beta_2 \cdot (x_2 - \bar{x}_2) \quad (\text{b.11.1})$$

hvor  $\bar{x}_1$  og  $\bar{x}_2$  er middelværdien for de intervaller som variablene  $x_1$  og  $x_2$  dækker i forsøget.

Der er tale om lineær regressionanalyse, fordi koefficienterne  $\alpha_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  indgår lineært med de uafhængige variable  $x_1$  og  $x_2$ .

#### 11.2 Beregninger.

Med henvisning til ref. [6] side 283 - 287.

Lineær model med 2 variable med n observationer i hvert af  $t=r \cdot c$  forskellige punkter  $(x_{1(r)}, x_{2(c)})$ .

##### Model:

På grundlag af talsæt  $(x_{1(r)}, x_{2(c)}, y_{(rc)})$ , hvor  $y_{(rc)}$  er uafhængige observationer af statistisk uafhængige, normalfordelte variable  $Y_{(rc)}$  med samme varians  $\sigma^2$ , kan man teste om middelværdierne,  $E(Y)$ , af denne variabel  $Y_{(rc)}$  følger lineære modeller givet ved:

$$\text{Model 2: } E(Y|x_1, x_2) = \alpha_0 + \beta_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_{(r)}) + \beta_2 \cdot (x_2 - \bar{x}_{(c)}) \quad (\text{b.11.2})$$

$$\text{Model 1: } E(Y|x_1, x_2) = \alpha_0 + \beta_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_{(r)}) \quad (\text{b.11.3})$$

$$\text{Model 0: } E(Y|x_1, x_2) = \alpha_0 \quad (\text{b.11.4})$$

hvor model 2 refererer til, at variabel  $Y_{(rc)}$  afhænger af to variable,  $x_1$  og  $x_2$ .  
 model 1 refererer til, at variabel  $Y_{(rc)}$  afhænger af een variable,  $x$ .  
 model 0 refererer til, at variabel  $Y_{(rc)}$  ikke afhænger af de undersøgte variable,  $x_1$  og  $x_2$ .

Først optegnes et sumskema som hjælpeskema til de efterfølgende beregninger.

|   |                  | Søjlefaktor C |           |             |                  |           |                  |
|---|------------------|---------------|-----------|-------------|------------------|-----------|------------------|
|   |                  | $C_1$         | $C_2$     | $C_{\cdot}$ | $C_{\cdot\cdot}$ | $C_j$     | Sum $S_{i\cdot}$ |
| R | $r_1$            | $n_{obs}$     | $n_{obs}$ | $n_{obs}$   | $n_{obs}$        | $n_{obs}$ |                  |
|   | $r_2$            | $n_{obs}$     | $n_{obs}$ | $n_{obs}$   | $n_{obs}$        | $n_{obs}$ |                  |
|   | $r_i$            | $n_{obs}$     | $n_{obs}$ | $n_{obs}$   | $n_{obs}$        | $n_{obs}$ |                  |
|   | SUM $S_{j\cdot}$ |               |           |             |                  |           | $S_{ij}$         |

Tabel 7.0 Sumskema til dobbelt regressionsanalyse.

Ved brug af elektronregner med et program for enkelt regressionsanalyse kan følgende fremgangsmåde bruges:

For hvert  $rc$  indtastes alle værdier  $y_{ij}$ , hvoraf fås

Cellesummen,  $S_{(rc)}$ , og cellespredningen  $s_{(rc)}$

Herefter beregnes,  $SAK_0 = (n-1) \cdot \sum s_{(rc)}^2$ ,  $SAK$  = Summen af afvigelses kvadrat.

Alle punkter  $(x_i, S_{i\cdot})$  indtastes, hvoraf fås

$$\bar{X}_1 \text{ og } SAK_{X1} = n \cdot (t-1) \cdot s_{X1}^2$$

$$SAK_{\text{punkter}} = (t-1) \cdot \frac{s_{\text{punktsummer}}^2}{n}$$

$$SAK_{\text{total}} = SAK_0 + SAK_{\text{punkter}}$$

$$SAP_{n \cdot Y} = SAK_n \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer...}}}{n}$$

Bedste estimat a for  $\alpha_0$  er:

$$a = S_{ij}/N, \text{ hvor } N=r \cdot c \cdot n$$

Alle punkter  $(x_2, S_{j..})$  indtastes, hvoraf fås

$$\bar{X}_2 \text{ og } SAK_{c/v} = n \cdot (t-1) \cdot s^2_{X2}$$

$$SAP_{X2/Y} = SAK_{X2} \cdot \frac{(b_1)_{\text{punktsummer...}}}{n}, \text{ SAP} = \text{Summen af afvigelsernes produkt.}$$

$$SAP_{X1/X2} = SAK_{X1} \cdot (b_1)_{X2\text{-værdier}}$$

NB:  $SAP_{X1/X2} = 0$ , hvis forsøget er fuldstændigt balanceret, dvs. hvis f.eks. de valgte c-søjlefaktor-niveauer er fastholdt for hvert r-række-niveauskift i forsøgsplanen.

Herefter bestemmes de bedste estimater  $b_1$ ,  $b_2$  for  $\beta_1$  og  $\beta_2$  af følgende to ligninger med to ubekendte, som løses på sædvanlig måde.

$$\begin{aligned} b_1 \cdot SAK_{X1} + b_2 \cdot SAP_{X1/X2} &= SAP_{X1/Y} \\ b_1 \cdot SAP_{X1/X2} + b_2 \cdot SAK_{X2} &= SAP_{X2/Y} \end{aligned}$$

Hermed er den bedste regressionsmodel 2 estimeret.

Derefter opstilles testningsprocedure for hypotesetestning af regressionsmodellerne, 2,1,0, som ovenfor beskrevet.

Følgende beregninger foretages.

$$SAK_{\text{reg. model 2}} = b_1 \cdot SAP_{X1/Y} + b_2 \cdot SAP_{X2/Y}$$

$$SAK_{\text{res. model 2}} = SAK_{\text{punkter}} - SAK_{\text{reg. model 2}}$$

$$SAK_{\text{reg. model 1}} = \frac{SAP_{X1/Y}}{SAK_{X1}} \cdot SAP_{X1/Y}$$

$$SAK_{\text{res. model 1}} = SAK_{\text{punkter}} - SAK_{\text{reg. model 1}}$$

$$SAK_{\text{model 1}} = SAK_{\text{res. model 1}} - SAK_{\text{res. model 2}}$$

Evt. poolede estimater beregnes under den efterfølgende testning.

$$s^2_{m1} = \frac{SAK_0 + SAK_{\text{res. model 2}}}{f_0 + f_{\text{res. model 2}}}$$

$$s^2_{m2} = \frac{SAK_0 + SAK_{res. model 2} + SAK_{model 1}}{f_0 + f_{res. model 2} + f_{model 1}}$$

En variansanalysetabel oprettes som oversigt for efterfølgende hypotesetestninger og resultater heraf i kolonne F.

| Variation                           | SAK (1)                     | f (2)                           | s <sup>2</sup> (1)/(2)                 | F                       |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|
| Regres model 1                      | SAK <sub>reg. model 1</sub> | f <sub>reg. model 1</sub> = 1   | s <sup>2</sup> <sub>reg.model 1</sub>  | (F <sub>model 0</sub> ) |
| Residual model 1 - residual model 2 | SAK <sub>model 1</sub>      | f <sub>model 1</sub> = 1        | s <sup>2</sup> <sub>model 1</sub>      | (F <sub>Model 1</sub> ) |
| Residual model 2                    | SAK <sub>res. model 2</sub> | f <sub>res. model 2</sub> = t-3 | s <sup>2</sup> <sub>res. model 2</sub> | (F <sub>Model 2</sub> ) |
| Gentagelse                          | SAK <sub>0</sub>            | f <sub>0</sub> = N-t            | s <sup>2</sup> <sub>0</sub>            |                         |
| Total                               | SAK <sub>total</sub>        | f <sub>total</sub> = N-1        |                                        |                         |

Tabel 7.1 Variansanalysetabel.

### 11.3 Testninger.

- 1) Først hypotesetestes om regressionsmodel 2 kan bruges som modelbeskrivelse til forsøgsresultaterne.

Tester H<sub>0</sub> : Model 2 gælder mod H: Model 2 gælder ikke

F<sub>model 2</sub> > F<sub>0,95</sub> ( f<sub>res.model 2</sub> , f<sub>0</sub> ) ? ja: Model 2 gælder ikke<sup>Note 1)</sup> ;  
testning slut.

nej: Model 2 gælder<sup>Note 2)</sup> ;  
testning fortsætter, se punkt 2)

Note 1) Forkortet skriveform for:

Forkastelse af hypotesen H<sub>0</sub>: Model 2 gælder.

Note 2) Forkortet skriveform for:

Accept af hypotesen H<sub>0</sub>: Model 2 gælder.

Hvor F<sub>0,95</sub> kan findes i en statistisk tabel over F-fordelingen.

For specialtilfældet, hvor der kun foretages een gentagelse af forsøgsplanen, n = 1 henvises til nedenstående afsnit, "Specialtilfældet n=1".

2) Tester derefter om regressionsmodel 2 kan forenkles til model 1.

Tester  $H_0 : b_2 = 0$  mod  $H: b_2 \neq 0$

$F_{\text{model 1}} > F_{0,95} ( f_{\text{model 1}} , f_{m1} ) ?$

ja: Model 1 gælder ikke ;  
testning slut.

nej: Model 1 gælder ;  
testning fortsætter, se punkt 3)

3) Tester tilsidst evt. om regressionsmodel 1 kan forenkles til model 0.

Tester  $H_0 : b_1 = 0$  mod  $H: b_1 \neq 0$

$F_{\text{model 0}} > F_{0,95} ( f_{\text{reg.model 1}} , f_{m2} ) ?$

ja: Model 0 gælder ikke ;

nej: Model 0 gælder ;

#### Specialtilfældet $n=1$ :

Hvis der kun foretages en gentagelse af forsøgsplanen,  $n = 1$ , kan man ikke teste om model 2 kan antages at kunne bruges som modelbeskrivelse til forsøgsresultaterne, fordi  $SAK_0 = 0$ .

Istedet må man foretages en visuel vurdering af om model 2 kan benyttes.

Først udregnes residualerne  $r = Y_{\text{observeret } Y} - Y_{\text{estimeret } Y \text{ ved model 2}}$

Dernæst plottes punkterne ( $Y_{\text{estimeret } Y \text{ ved model 2}} , r$ ) i et retvinklet koordinatsystem, hvorefter man vurderer, om de afsatte punkter grupperer sig tilfældigt omkring x-aksen.

Hvis det er tilfældet kan man antages at model 2 kan benyttes som beskrivende model af resultaterne.

Herefter foretages hypotesetestninger på model 2 som ovenfor beskrevet i testpunkterne 2) og 3).

#### **11.4 Konfidensintervaller.**

Der kan beregnes 95%-konfidensintervaller for middelværdien af  $Y$ , afhængig af variablene  $x_1$  og  $x_2$ , ved hjælp af nedenstående formler

Med henvisning til ref. [6] side 287 fås formel b.11.5, hvis det kan antages at model 2 kan benyttes som beskrivende model:

$$E(Y | x_1, x_2) : [\mu - t_{0,975}(f_{m1}) \cdot s_{m1} \cdot K_2 ; \mu + t_{0,975}(f_{m1}) \cdot s_{m1} \cdot K_2] \quad (b.11.5)$$

hvor  $\mu = \alpha_0 + \beta_1 \cdot (\bar{x}_1 - x_1) + \beta_2 \cdot (\bar{x}_2 - x_2)$

Hvilket giver følgende beregningsudtryk for konfidensinterval, ligning b.11.6.

$$E(Y | x_1, x_2) = [a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c - \bar{c}) - t_{0,975}(f_m) \cdot s_m \cdot K_2 ; a + b_1 \cdot (n - \bar{n}) + b_2 \cdot (c - \bar{c}) + t_{0,975}(f_m) \cdot s_m \cdot K_2] \quad (b.11.6)$$

hvor  $t_{0,975}(f_m)$  aflæses i statistisk tabel over t-fordelingen.

$s_{m1}$  beregnes af  $s^2_{m1}$ , som der er opstillet beregningsudtryk for.

For beregning af værdien  $K_2$  beregnes først værdien  $D_{n-c/v}$ .

$$D_{x1x2} = SAK_{x1} \cdot SAK_{x2} - SAP^2_{x1x2}$$

Herefter indsættes det i formel (b.11.7) for  $K_2$ .

$$K_2 = \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{SAK_{x1} \cdot (X_2 - \bar{X}_2)^2 + SAK_{x2} \cdot (X_1 - \bar{X}_1)^2 - 2 \cdot SAP_{x1x2} \cdot (X_1 - \bar{X}_1) \cdot (X_2 - \bar{X}_2)}{D_{x1x2}}} \quad (b.11.7)$$

Ligeledes kan der opskrives et 95%-konfidensintervaller for middelværdien af Y afhængig af en variable x. Dvs. hvis det kan antages, at model 1 kan benyttes som beskrivende model:

Med reference ref [6] side 177, formel (18).

$$E(Y | x) = [\mu - t_{0,975}(f_m) \cdot s_m \cdot \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{SAK_x}} ; \mu + t_{0,975}(f_m) \cdot s_m \cdot \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{SAK_x}}] \quad (b.11.8)$$

hvor  $\mu = \alpha_0 + \beta_1 \cdot (x - \bar{x})$

$t_{0,975}(f_m)$  aflæses i statistisk tabel over t-fordelingen.

$s_m$  beregnes af  $s^2_{m2}$ , som der er opstillet beregningsudtryk for.

## Bilag 12

### 12.0 STATISTISK UNDERSØGELSE AF BRUDSTYRKERNES AFHÆNGIGHED AF TILSLAGETS FUGTINDHOLD.

#### 12.1 Generelt

Undersøgelsen er foretaget med en let konstruktionsbeton fremstillet med LECA T som groft tilslagsmateriale, c/v-forhold = 0,45 og volumenandel tilslag = 0,4.

Da formålet med undersøgelsen er at konstatere om tilslagets fugtindhold ved blanding af betonen har nogen indflydelse på den opnåede brudstyrke efter 28 døgns vandlagring eller ej, har det ikke interesse at opstille en regressionsmodel for fugtens indflydelse på betonstyrken.

Istedet foretages der en variansanalyse til testning af om den gennemsnitlige brudstyrke, afhængig af fugtindholdet ved blandingen af betonen, afhænger af fugt%-en i tilslaget.

#### 12.2 Forudsætning

Ved en variansanalyse forudsættes der ligesom i en regressionsanalyse at den afhængige variable, brudstyrken, er en statistisk normalfordelt variabel.

At variablen, brudstyrke, er normalfordelt antages at gælde, uden at det iøvrigt er undersøgt nærmere.

Den statistiske uafhængighed mellem prøveblandingerne er søgt sikret ved at udføre et fuldstændigt randomiseret forsøg, hvor rækkefølgen af betonblandingerne, med hensyn til fugtprocenten i tilslaget, er valgt i tilfældig rækkefølge.

Ved en variansanalyse kræves endvidere, at der i forsøget er varianshomogenitet. Det vil i dette tilfælde sige, at brudstyrkerne, der er opnået ved forskellige fugtindhold i tilslaget, kan antages at fremkomme fra normalfordelinger med samme varians.

Til testning om der i forsøget er varianshomogenitet kan der foretages ved en Bartlett's test. For teorien til Bartlett's test henvises til bilag 13.

På de efterfølgende sider foretages en Bartlett's test om der kan antages varianshomogenitet i forsøget med variende fugtindhold i tilslagsmaterialet.

Det vil sige en testning af hypotesen  $H_0$ :

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_7^2 \text{ mod } H: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \dots \neq \sigma_7^2$$

### 12.3 Bartlett's test til undersøgelse af varianhomogenitet.

De opnåede brudstyrker for hver betoncylinder afhængigt af fugtprocenten i tilslaget er vist i nedenstående tabel 7.5.

| Fugt% | Brudstyrker, MPa |       |       |       |       |       | Sum   |
|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0     | 11,93            | 13,18 | 13,45 | 12,61 | 12,37 | 13,13 | 76,67 |
| 6,36  | 14,62            | 12,99 | 13,99 | 14,11 | 14,05 | 14,44 | 84,20 |
| 12,40 | 12,94            | 14,32 | 14,25 | 13,39 | 13,71 | 13,48 | 82,09 |
| 16,61 | 13,93            | 13,70 | 14,34 | 14,35 | 14,68 | 14,19 | 85,19 |
| 22,61 | 14,37            | 13,99 | 14,40 | 14,27 | 13,68 | 13,26 | 83,97 |
| 28,60 | 13,88            | 13,96 | 14,09 | 14,30 | 13,83 | 13,48 | 83,54 |
| 43,10 | 15,22            | 15,23 | 14,36 | 14,70 | 14,67 | 14,61 | 88,79 |

Tabel 7.5 28-døgns brudstyrker for samtlige betoncylindre afhængigt af fugtprocenten.

Før Bartlett's test kan gennemføres skal der foretages nogle delberegninger af talstørrelser der indgår i teststørrelsen.

I nedenstående hjælpeskema, tabel 7.6, er de beregnede talstørrelser vist.

| fugt% | $n_i - 1$ | $s_i^2$ | $(n_i - 1) \cdot \ln s_i^2$ | $1/(n_i - 1)$ |
|-------|-----------|---------|-----------------------------|---------------|
| 0,00  | 5         | 0,330   | -5,5433                     | 0,20          |
| 6,36  | 5         | 0,320   | -5,6972                     | 0,20          |
| 12,40 | 5         | 0,280   | -6,3648                     | 0,20          |
| 16,61 | 5         | 0,120   | -10,6013                    | 0,20          |
| 22,61 | 5         | 0,200   | -8,0472                     | 0,20          |
| 28,60 | 5         | 0,076   | -12,8851                    | 0,20          |
| 43,10 | 5         | 0,078   | -12,7552                    | 0,20          |
| Total | 35        |         | -61,8941                    | 1,40          |

Tabel 7.6 Hjælpeskema til udførelse af Bartlett's test.

### 12.3.1 Beregninger

Beregninger til udregning af Bartlett's  $\chi^2$ -teststørrelse for de indgående måleresultater efter formelen b.13.1 bilag 13.

$$\chi^2 = \frac{(N-k) \ln s^2 - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln s_i^2}{1+A} \quad (\text{b.13.1})$$

Til brug i tælleren udregnes:

$$s^2 = 5 \cdot \frac{(0,330 + 0,320 + 0,280 + 0,120 + 0,200 + 0,076 + 0,078)}{35} = 0,20$$

$$(N-k) \ln s^2 = (42-7) \cdot \ln 0,20 = -56,3303$$

Det vil sige at tælleren kan beregnes til størrelsen:

$$\text{Tæller} = -56,3303 - (-61,8941) = 5,5638$$

Til brug i nævneren udregnes:

$$A = \frac{1}{3 \cdot (7-1)} \cdot (1,40 - \frac{1}{35}) = 7,619 \cdot 10^{-2}$$

$\chi^2$ -teststørrelse beregnes dernæst til

$$\chi^2 = \frac{5,5638}{1+A} = 5,1699$$

### 12.3.2 Testning

$$5,16 \leq \chi^2_{0,95}(6) = 12,59 ?$$

Ja, da 5,16 ikke er større end 12,59 kan det ikke afvises, at der i forsøget er varianshomogenitet imellem normalfordelinger for brudstyrkeresultaterne afhængigt af fugtprocenten af tilslaget.

#### 12.3.3.4 Konklusion.

Kravene for en variansanalyse er derfor opfyldt, så der kan foretages en variansanalyse til undersøgelse af indflydelsen fra tilslagets fugtprocent på den opnåede brudstyrke.

## 12.4 Variansanalyse til test af tilslagets fugtprocent indflydelse på betonemes brudstyrke.

For teorien til en ensidet variansanalyse henvises til bilag 14.

### 12.4.1 Beregninger

$$SAK_{\text{total}} = (N-1) \cdot s^2_{\text{total}} = (42-1) \cdot 0,5034 = 20,6402$$

$$SAK_R = (7-1) \cdot 13,3649/6 = 13,3649$$

Variansanalysetabel med resultater for nedenstående hypotesetestning angivet i kolonne F.

| Variation   | SAK     | f  | $s^2 = f/SAK$ | F             |
|-------------|---------|----|---------------|---------------|
| Rækker      | 13,3649 | 6  | 2,23          | 10,7( $F_R$ ) |
| Gentagelser | 7,2753  | 35 | 0,208         |               |
| Total       | 20,6402 | 41 |               |               |

Tabel 7.7 Resulterende variansanalysetabel for forsøg med varierende fugtprocent i tilslaget, LECA T.

### 12.4.2 Testning.

Herefter foretages der en hypotesetestning om rækkefaktoren, fugtenprocenten, har nogen indflydelse.

$$H_0 : R = 0 \quad \text{mod } H: R \neq 0$$

$$10,7 > F_{0,999}(6,35) = 4,927?$$

### 12.4.3 Konklusion

Ja, da 10,7 ikke er større end 4,927, er der \*\*\*signifikans for, at fugten har en indflydelse på brudstyrken.

## 12.5 Konfidensintervaller for brudstyrken afhængigt af tilslagets fugtprocent.

Derefter opstilles derfor 95%-konfidensintervaller for at undersøge, hvilke brudstyrker der er forskellige fra hinanden.

For beregningsudtrykkene der ligger til grund for 95% konfidensintervallerne henvises til beskrivelsen i bilag 14.

Beregningsudstrykket er givet ved ligning (b.12.1)

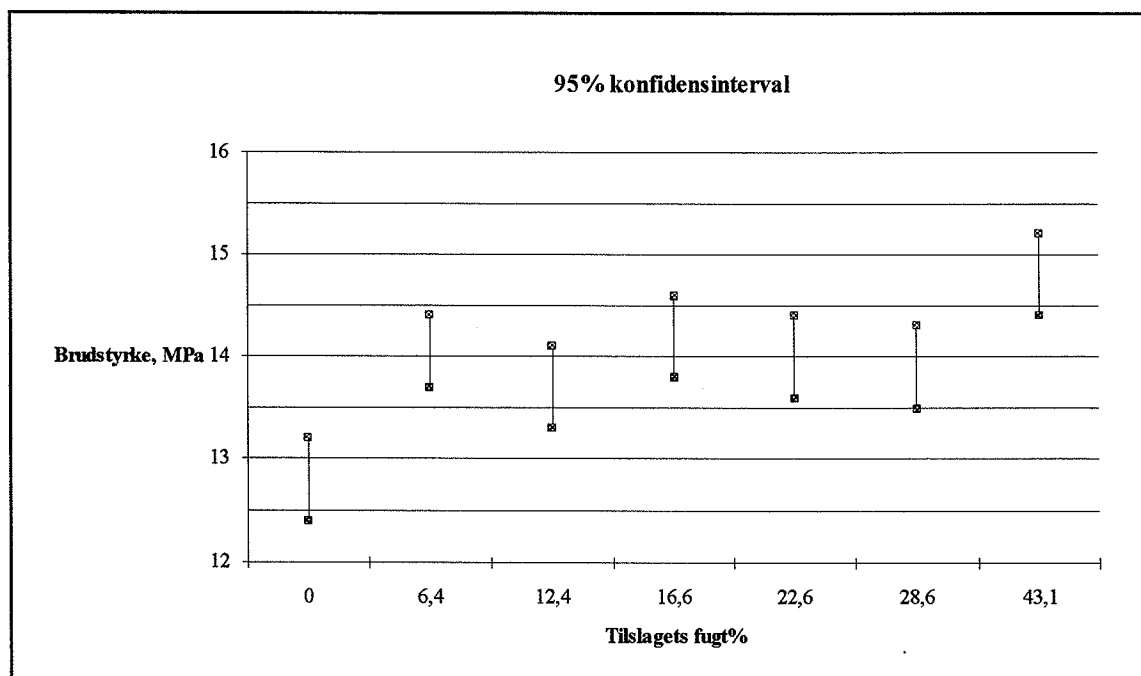
$$E(X_{\text{brudstyrke}}) = [\bar{X}_{\text{brudstyrke ved given fugt\%}} - t_{0,975}(f_0) \cdot \sqrt{\frac{s_0^2}{n}} ; \bar{X}_{\text{brudstyrke ved given fugt\%}} + t_{0,975}(f_0) \cdot \sqrt{\frac{s_0^2}{n}}] \quad (\text{b.12.1})$$

hvor  $t_{0,975}(35) = 2,03$ ,  $s_0^2 = 0,208$  og  $n=6$ .

Konfidensintervaller for gennemsnitlig estimat på brudstyrken som afhængigt af fugtprocenten i tilslaget ved blandeprocessen er beregnet nedenfor:

|                              |                              |                              |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <u>0,00% fugt i tilslag</u>  | <u>6,36% fugt i tilslag</u>  | <u>12,40% fugt i tilslag</u> |
| [12,4;13,2]                  | [13,7;14,4]                  | [13,3;14,1]                  |
| <u>16,61% fugt i tilslag</u> | <u>22,61% fugt i tilslag</u> | <u>28,60% fugt i tilslag</u> |
| [13,8;14,6]                  | [13,6;14,4]                  | [13,5;14,3]                  |
| <u>43,10% fugt i tilslag</u> |                              |                              |
| [14,4;15,2]                  |                              |                              |

For at få et bedre overblik er konfidensintervallerne for brudstyrkerne afhængigt af tilslagets fugtprocent er intervallerne optegnet i nedenstående figur (7,3)



Figur 7.3 Konfidensinterval for estimeret brudstyrke afhængigt af tilslagets fugtprocent for beton fremstillet med LECA T.

Af figur 7.3 ses det, at brudstyrken er mindre ved 0% fugt end ved 43% fugt i tilslaget. For de mellemliggende fugtprocente, 6-29%, kan de antages at give samme brudstyrke i betonen.

## 13.0 STATISTIKKEN I FORBINDELSE MED BARTLETTS TEST.

### 13.1 Generelt

Følgende beskrivelse af Bartletts test er refereret fra L. Brøndum og J. D. Monrad. Statistisk II, Anvendt statistik 1. rev. udgave 1985. DEN PRIVATE INGENIØRFOND, København 1985. Ref. [8].

Ved Bartletts test testes om række,  $k$ , normalfordelte variable kan antages at have den samme varians,  $\sigma^2$ , hvilket er en af forudsætningerne for at en varians- eller regressionsanalyse kan foretages.

Nulpunktshypotesen  $H_0$  i en Bartletts test er altså at:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2$$

$\sigma^2$  = variansen i en normalfordeling.

### 13.2 Beregninger.

Følgende beregninger foretages inden en  $\chi^2$ -test kan foretages, hvor der testes op mod  $\chi^2$ -fordelingen.

Først beregnes  $\chi^2$ -teststørrelsen for de indgående måleresultater efter følgende formel

$$\chi^2 = \frac{(N-k) \ln s^2 - \sum_{i=1}^k (n_i-1) \ln s_i^2}{1+A} \quad (\text{b.13.1})$$

hvor

$$N = \sum_{i=1}^k n_i$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i-1) s_i^2}{N-k} = \text{pooled estimat for } \sigma^2$$

$$A = \frac{1}{3(k-1)} \left( \left( \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i-1} \right) - \frac{1}{N-k} \right)$$

og  $n$  = antal gentagelser for hver forsøgsbehandling og  $k$  = antal forsøgsbehandlinger.

Som hjælp til gennemførelse af beregningerne kan følgende hjælpeskema, tabel 7.8, benyttes.

|                       |        | $n_i - 1$ | $s_i^2$ | $(n-1)\ln s_i^2$ | $\frac{1}{n_i-1}$ |
|-----------------------|--------|-----------|---------|------------------|-------------------|
| Behandlings-<br>typer | A      |           |         |                  |                   |
|                       | B      |           |         |                  |                   |
|                       | C      |           |         |                  |                   |
|                       | D      |           |         |                  |                   |
|                       | ·<br>· |           |         |                  |                   |
| SUM =                 |        |           |         | SUM =            | SUM =             |

Tabel 7.8 Hjælpeskema til brug ved beregninger i Bartletts test.

### 13.3 Testninger

Efter beregning af  $\chi^2$ -teststørrelsen foretages testningen på følgende måde

$\chi^2 \leq \chi^2_{0,95} (k-1)$ ?      ja:      Dvs. ingen signifikans mod  $H_0$ -hypotesen, og rækken af normalfordelte variable kan derfor antages at have den samme varians.

Nej:      Dvs. signifikans mod  $H_0$ -hypotesen, og rækken af normalfordelte variable kan derfor ikke antages at have den samme varians, hvorfor varians- eller regressionsanalyse ikke bør foretages.

$\chi^2_{0,95}$  aflæses i en  $\chi^2$ -tabel.

## 14.0 STATISTIKKEN I FORBINDELSE MED ENSIDET VARIANSANALYSE.

### 14.1 Generelt

Følgende beskrivelse af ensidet variansanalyse er refereret fra L. Brøndum og J. D. Monrad. Statistisk II, Anvendt statistik, 1. udgave 1985. Den private ingeniørfond, København 1985. Ref. [8].

Sidehenvisninger gives i teksten.

I en enkelt variansanalyse indgår kun en rækkefaktor R med r niveauer ( $R_i$ ).

For nogle, evt. alle, af rækkeniveauer foreligger observationer  $Y_{ij}$  af en bestemt kvantitativ egenskab (I dette projekt brudstyrken).

I den statistiske model forudsættes, at de variable  $Y_{ij}$  er statistisk uafhængige, normalfordelte variable med samme varians  $\sigma^2$ .

Den statistiske uafhængighed såvel mellem de gentagne observationer af hver enkelt variabel som mellem disse indbyrdes søges sikret ved en hensigtsmæssig forsøgsplan og -udførelse. Kravet vil eksempelvis være opfyldt såfremt den benyttede forsøgsplan er et fuldstændigt randomiseret forsøg.

### 14.2 Beregninger.

Med henvisning til ref. [8] side 440-441.

Først optegnes et sumskema som hjælpeskema til de efterfølgende beregninger.

|               |       |     |     |     |     |     | Sum $S_{i..}$ |
|---------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|---------------|
| R             | $r_1$ | obs | obs | obs | obs | obs |               |
|               | $r_2$ | obs | obs | obs | obs | obs |               |
|               | $r_i$ | obs | obs | obs | obs | obs |               |
| SUM $S_{j..}$ |       |     |     |     |     |     | $S_{ij}$      |

obs=resultat af forsøget.

Tabel 7.9 Sumskema til dobbelt regressionsanalyse.

Ved brug af elektronregner med et program med  $\bar{x}$  og s-program kan følgende fremgangsmåde bruges:

$$\begin{aligned} SAK_{\text{total}} &= (N-1) \cdot s_{\text{total}}^2 \\ SAK_R &= (r-1) \cdot \frac{s_{\text{rækkesummer}}^2}{n} \\ SAK_0 &= SAK_{\text{total}} - SAK_R \end{aligned}$$

En variansanalysetabel oprettes som oversigt for efterfølgende hypotesetestninger og resultater heraf i kolonne F.

| Variation   | SAK (1)              | f (2)                    | $s^2 (1)/(2)$ | F                       |
|-------------|----------------------|--------------------------|---------------|-------------------------|
| Rækker      | $SAK_R$              | $f_R = 1$                | $s_R^2$       | $(F_R = s_R^2 / s_0^2)$ |
| Gentagelser | $SAK_0$              | $f_0 = N-r$              | $s_0^2$       |                         |
| Total       | $SAK_{\text{total}}$ | $f_{\text{total}} = N-1$ |               |                         |

Tabel 7.10 Variansanalysetabel for ensidet variansanalyse.

### 14.3 Testninger.

Der hypotesetestes om rækkefaktoren kan antages ikke at have nogen indflydelse på de opnåede forsøgsresultater på følgende måde.

Tester  $H_0$  : Rækkefaktor har ingen indflydelse mod  $H$ : Rækkefaktor har indflydelse.

$$F_R > F_{0,95} (f_R, f_0) ? \text{ ja: } R \neq 0^{\text{Note 1)}$$

$$\text{nej: } R = 0^{\text{Note 2)}$$

Note 1) Forkortet skriveform for:

Forkastelse af hypotesen  $H_0$ : Rækkefaktoren har en indflydelse på de opnåede forsøgsresultater.

Note 2) Forkortet skriveform for:

Accept af hypotesen  $H_0$ : Rækkefaktoren har ingen indflydelse på forsøgsresultatet.

Hvor  $F_{0,95}$  kan findes i en statistisk tabel over F-fordelingen.

### 14.4 Konfidensintervaller

Der kan beregnes 95%-konfidensintervaller for middelværdien af Y, afhængig af indflydelsen af den undersøgte faktors niveauer ved hjælp af nedenstående formel.

Med henvisning til ref. [8] side 441 fås formel b.14.1, hvis det kan antages at faktoren har en indflydelse på forsøgsresultaterne:

$$E(Y) : \left[ \bar{X}_{\text{ved betragtet niveau af faktoren}} - t_{0,975}(f_0) \cdot \sqrt{\frac{s_0^2}{n}} ; \bar{X}_{\text{ved betragtet niveau af faktoren}} + t_{0,975}(f_0) \cdot \sqrt{\frac{s_0^2}{n}} \right] \quad (\text{b.14.1})$$

hvor  $t_{0,975}(f_0)$  aflæses i statistisk tabel over t-fordelingen.  
 $s_0^2$  aflæses i variansanalysetabellen.

Ligeledes kan der opskrives et 95%-konfidensintervaller for total af Y, hvis det kan antages, at faktoren ingen indflydelse har på forsøgsresultaterne: Konfidensintervallet i den situation er givet ved formel b.14.2.

$$E(Y) : \left[ \bar{X}_{\text{af alle forsøgsresultater}} - t_{0,975}(f_{\text{total}}) \cdot \sqrt{\frac{s_{\text{total}}^2}{n}} ; \bar{X}_{\text{af alle forsøgsresultater}} + t_{0,975}(f_0) \cdot \sqrt{\frac{s_{\text{total}}^2}{n}} \right] \quad (\text{b.14.2})$$

hvor  $t_{0,975}(f_0)$  aflæses i statistisk tabel over t-fordelingen.  
 $s_{\text{total}}^2$  aflæses i variansanalysetabellen.