

Yttäckande packningskontroll

Metodbeskrivning 603:1994

1. Orientering	3
2. Sammanfattning	3
3. Benämningar	3
4. Grundläggande förutsättningar.....	4
4.1 Allmänna grunder för yttäckande packningskontroll.....	4
4.2 Underlagets inverkan på vältmätarvärdet.....	5
4.2.1 Mät djupet	5
4.2.2 Kornfördelning	5
4.2.3 Vattenkvot	6
4.3 Dubbelslag.....	6
5. Utrustning	7
5.1 Vibrationsvält	7
5.2 Mät- och dokumentationsutrustning.....	7
5.3 Maskinparametrarnas inverkan på vältmätarvärdet	8
6. Användbarhet och begränsningar av metoden	8
6.1 Vältmätarvärdet som del av acceptans-kontroll.....	8
6.2 Styrning av packningsarbete	9
7. Acceptanskontroll.....	9
7.1 Packningsutförande	9
8. Egenkontroll.....	10
8.1 Packningsutförande	10
9. Rapport	10
Bilaga - Kalibrering av vältmätare	11

1. Orientering

Yttäckande packningskontroll är avsedd för kontinuerlig registrering och dokumentation av fasthet i obundna jord- eller bergmaterial.

Packningskontrollen sker med särskild provningsvält eller annat packningsredskap kompletterat med mät- och dokumentationsutrustning.

Vanligtvis är mätutrustningen monterad på vältens trumma och kan användas under hela packningsarbetet. Genom att kontrollen blir en integrerad del av byggprocessen kan packningsarbetet optimeras allt efter packningsbetingelserna.

Mätutrustningar finns av flera fabrikat och med delvis olika mätprinciper. Resultatet lagras i en separat dokumentationsenhet.

Mätresultatet från yttäckande, vältmonterade packningsmätare är ett dimensionslöst mätvärde på fastheten hos lager liggande under välten.

För att relatera vältmätarvärdet till fysikaliska egenskaper hos materialet krävs att kalibrering utförs mot konventionella mätmetoder.

2. Sammanfattning

Syftet med kontrollen är att skapa ett i packningsarbetet integrerat system så att vältföraren och arbetsledningen under packningsarbetet direkt kan avgöra:

- när fortsatt packningsarbete inte längre är meningsfullt
- om i kombination med reducerad konventionell packningskontroll fastheten och lagerstyvheten är tillräckligt hög för att motsvara ställda krav på packningsresultatet.

Metoden kan i princip användas på samtliga jordartstyper och på samtliga lager.

På fin- och blandkorniga material med vattenhalt över den för packning optimala kan svårigheter dock uppstå vid tolkningen av främst slut-resultatet av packningen och i vissa fall effekten av packning.

De dokumenterade mätresultaten kan användas för att finna orsaker till skador, som kan uppträda i vägytan i ett senare skede.

3. Benämningar

Acceptanskontroll är den metod som anges i VÄG 94 för att utvärdera packningsresultatet för en yta (ett kontrollobjekt).

Egenkontroll är den metod som utföraren använder för att bedöma och styra packningsarbetet.

Komprimering är tätheten i materialet och bestäms vanligen som packningsgrad.

Kontrollobjekt - objekt t ex lageryta, vägsträcka med väldefinierad geografisk utsträckning för vilken kravuppfyllelse skall avgöras med hjälp av statistisk acceptanskontroll.

Mätdjup är det djup under markytan från vilket det dynamiska mätvärdet påverkas.

Mätvält är en vibrationsvält, som är försedd med speciellt anpassat mätsystem men också med uppgift att utföra packningsarbete.

Packningsdjup är det djup under markytan till vilket en välts packningsverkan når.

Provningsvält är en mätvält kalibrerad för packningskontroll.

Självgående vibrationsvält kan bestå av en slät stålvals med vibrationsanordning och gummihjulsdrift.

En grundläggande skillnad finns mellan vibrationsvältar som huvudsakligen alstrar vertikala svängningar och oscillerande vältar som huvudsakligen alstrar horisontella svängningar.

Styvhet är förhållandet mellan påförd last och deformation och bestäms vanligen i form av E-moduler.

Välmätarvärde (VMV) är ett samlingsbegrepp på mätvärden registrerade med yttäckande dynamisk packningsprovning oberoende av mätsystem.

Ytenhet är en delyta av underlaget vars bredd är lika med valsbredden på välten och vars längd utgör produkten av välthastigheten (t ex 0,6 m/s) och tiden för en enskild mätning (t ex 0,5 s). För varje ytenhet registreras ett mätvärde.

Yttäckande dynamisk packningsprovning är ett förfarande vid vilket provytan uppdelas i längsgående stråk eller band med bredden lika med vältens bredd. Provningsöverfarter görs stråkvis så att varje ytenhet ingår i provningen.

4. Grundläggande förutsättningar.

4.1 Allmänna grunder för yttäckande packningskontroll

Vibrationsvältar innehåller en roterande massa som under packningsarbetet sätter valsen i svängning. Under packningen sker ett ständigt energiutbyte mellan valsen och underlaget (marken). Dämpningen av och resonansfrekvens för svängningssystemet jord/vals bestäms av friktionen mot underlaget, kornomlagringen i materialet och vågutbredningen.

Då alla dessa storheter förändras med tilltagande komprimering av underlaget, kan packningstillståndet bedömas genom analys av svängningarna.

De faktorer som påverkar VMV kan delas upp i två grupper, dels de som har att göra med själva utformningen av kraften (vibrationerna) från välten, dels de som påverkar underlagets fasthet och styvhet.

4.2 Underlagets inverkan på vältmätarvärdet

Med underlag menas de under välten liggande lagren ner till ett djup som motsvarar mätdjupet.

VMV påverkas av olika egenskaper hos underlaget. Eftersom yttäckande packningskontroll är en indirekt mätmetod av egenskaper och tillstånd i det packade lagret, såsom styvhet och komprimering, är det viktigt att andra faktorer - kornfördelning, vattenkvot och underliggande lagrets styvhet - varierar i minsta möjliga utsträckning.

VMV som bestämning av komprimering (packningsgrad eller bärighetskvot), är mer påverkligt av variationer i underlaget än VMV som bestämning av deformationsmodulen (E_v).

4.2.1 Mätdjupet

Mätdjupet har nedåt inga skarpa gränser utan beror på arten hos de svängningar, vilka överförs till marken, valsens vikt (massa) och kontaktytans storlek mot marken, den teoretiska svängningsamplituden samt i viss mån hastigheten och vibrationsfrekvensen. Vanligtvis överstiger mätdjupet det djup på vilket välten uträttar ett packningsarbete (packningsdjup).

Mätdjupet ökar med större svängningsamplitud och linjelast.

Typen av alstrade svängningar är av betydelse för mätdjupet. Vibrationsvältar med övervägande horisontella svängningar (oscillerande vältar) alstrar svängningar med en amplitud som snabbare avtar med djupet. Dessa vältar har ett mätdjup som bättre överensstämmer med packningsdjupet.

Djupet, från vilket en inhomogenitet påverkar mätvärdet, beror på utbredningen och tillståndet (fastheten) hos denna. Ett svagt parti under det lager som packas har större inverkan på VMV än ett motsvarande styvt parti.

Tunga vältars VMV påverkas av svaga partier från nivåer som betydligt överstiger 1 meter.

4.2.2 Kornfördelning

Kornfördelningen i materialet har inverkan på VMV. Inverkan är beroende av jordart och vältens verkningssätt.

Generellt gäller att grövre jordarter ger en högre styvhet i lagret och därmed också ett högre VMV.

Även materialkurvans form är av betydelse, eftersom den påverkar den inre stabiliteten i lagret. Ett ensgraderat material är mer instabilt än ett välgraderat. Inverkan av ensgradering är störst för den oscillerande välten, där kraften är mer horisontellt riktad. Detta leder till att den i större utsträckning registrerar om materialet är ostabilt genom att ge ett lägre VMV.

4.2.3 Vattenkvot

Vattenkvoten har stor inverkan på VMV. Med ökad andel finjord ökar inflytandet av vattenkvoten och sambandet mellan den dynamiska provningen och packningsgraden respektive deformationsmodulen är inte längre entydigt.

Variationer i vattenkvoten påverkar sambandet mellan VMV och packningsgrad i större utsträckning än mellan VMV och deformationsmodul.

- Grovkorniga material

Inflytandet av vattenkvoten är liten och mindre än inflytandet av materialsammansättningen. Men inverkan ökar med stigande finjordhalt och blir märkbar redan från 5 - 10 % finjordhalt.

- Bland- och finkorniga material (finkornhalt > 15 %)

Vattenkvoten har en mycket stor inverkan på styvheten hos materialet och därmed VMV. Redan vid vattenkvoter under den för packning optimala är påverkan på VMV stor. Eftersom bland- och finkorniga jordar i Sverige ofta innehåller relativt mycket vatten är vältmätaren vanligtvis inte en lämplig metod att bedöma packningsgrad i dessa.

4.3 Dubbelslag

Vid packning med vibrationsvält på mycket hårda underlag kan sk dubbelslag (dubbelstuds) förekomma. Det yttrar sig så att VMV oväntat sjunker i förhållande till vad som erhållits på samma yta tidigare.

Vibrationssvängningarna kommer i otakt och välten börjar vibrera med högre amplitud och lägre frekvens. Resultatet blir oregelbundna och felaktiga (lägre) VMV.

Åtgärden i detta fall är att ställa om välten till vibrering med låg amplitud (amplituden kan normalt ställas in till högt eller lågt värde). Genom att fortsätta packningen med låg amplitud erhålls information om eventuell tillväxt för VMV och dokumentation av lagrets bärighetsegenskaper.

Om VMV används för egenkontroll måste kalibreringar vara utförda med den använda amplituden.

5. Utrustning

5.1 Vibrationsvält

Prestanda hos en vibrationsvält som används i mättnings- och provningssyfte måste motsvara de som angivits av tillverkaren. Den måste också vara utrustad med regleranordning, så att hastighet och vibrations-frekvens kan hållas konstanta under mätningstiden.

Tandemvältar är inte lämpliga eftersom de kan slira med den drivande trumman och därmed omöjliggöra längdmätning. Bäst fungerar själv-gående vältar, men även en dragen vält går att använda om dokumentationsutrustningen monteras i dragfordonet.

5.2 Mät- och dokumentationsutrustning

Utrustningen måste funktionsprovas före montering.

Som mät- och dokumentationsutrustning används accelerometer, förstärkare och räkneenhet samt enheter för visning, registrering, lagring och utskrift av mätresultat.

Accelerometern skall fästas på vältens valsgavel enligt tillverkarens anvisning.

För att under packningsarbetet kunna göra en tillförlitlig registrering måste hastighet och frekvens kunna avläsas på ett visarinstrument eller en registreringsutrustning. För att styra packningsarbetet måste föraren dessutom kunna avläsa mätvärdet översiktligt över en yta och kunna jämföra med föregående överfarer.

De data som skall registreras kontinuerligt med lägesbestämning under packningsarbetet är:

- position (läge)
- mätvärden
- hastighet
- frekvens
- förekomst av dubbelslag. (Föraren skall anteckna förekomst av dubbelslag, om dessa inte registreras av utrustningen).

Andra data som skall lagras tillsammans med mätvärdena för varje vägyta, kontrollobjekt och provyta är:

- inställd amplitud
- objektbeskrivning [objekt, lager, position (läge)]
- typ av vält [modell, vikt (massa)]
- tidpunkt för mätning (år, datum, klockslag)

Dokumentationen skall vara sådan att en lägesbestämning inom 1 m kan göras för samtliga punkter på det registrerade kontrollobjektet.

5.3 Maskinparametrarnas inverkan på vältmätarvärdet

- Frekvens Högre vibrationsfrekvens ger lägre VMV
- Amplitud Lägre vibrationsamplitud ger lägre VMV
- Hastighet Högre valthastighet ger lägre VMV
- Anliggning Sämre anliggning av valsen mot underlaget ger lägre VMV
- Körriktning Backning av välten ger vanligtvis lägre VMV
- Dubbelslag Ger lägre VMV

Maskinparametrarnas frekvens, amplitud och hastighet skall hållas konstanta vid mätning.

6. Användbarhet och begränsningar av metoden

Metoden är användbar både som del av acceptanskontrollen och som egenkontroll. Användbarheten påverkas av materialegenskaperna hos det packade lagret. De faktorer som har störst inverkan på användbarheten är vattenkvoten, materialsammansättningen och underliggande lagers styvhet.

Grovkorniga material

På grovkorniga material finns ett mätbart samband mellan det dyna-miska mätvärdet från välten och de jordmekaniska egenskaperna (deformationsmodul, packningsgrad). Vattenkvoten har liten inverkan på resultatet.

Bland - och finkorniga material

Vid vattenkvoter under den optimala finns ett relativt klart samband mellan VMV och packningsresultat. Vid vattenkvoter omkring och över den optimala påverkas sambandet mellan VMV och packningsresultatet i större utsträckning av vattenkvoten än av komprimeringen av det utlagda lagret. VMV kan trots detta användas som en varning för dåligt packningsresultat, eftersom höga vattenkvoter leder både till låga VMV och ett dåligt packningsresultat. Det är svårare att bedöma packningsresultatet, när vattenkvoten är omkring den optimala. Även ett bra packningsresultat i form av komprimering ger relativt låga VMV vid denna vattenkvot. När vattenkvoten sjunker ökar styvheten.

Sambandet mellan styvhet och VMV finns, även om det är mer osäkert än vid grovkorniga material. Osäkerheten tilltar med ökad finjordsandel och ökad vattenkvot.

6.1 Vältmätarvärdet som del av acceptans-kontroll

Yttäckande packningskontroll med vältmonterad mätare i kombination med reducerad punktkontroll är användbar vid acceptanskontroll. VMV används därvid för att peka ut de två svagaste delytorna inom kontrollobjektet, där acceptanskontroll skall ske med konventionella punktkontrollmetoder.

Förfarandet vid yttäckande kontroll av packningen kan användas på olika lager i exempelvis en vägkropp.

På terrassen ställs krav på deformationsmodul (Ev2).

I överbyggnaden skall kraven uppfyllas antingen med avseende på bärighet och bärighetskvot eller packningsgrad.

6.2 Styrning av packningsarbete

Vältnätaren är ett bra hjälpmedel för att styra packningsarbetet, eftersom den är en integrerad del i packningen. Den är användbar på samtliga material för att visa om ytterligare packning leder till ökad komprimering.

Ett stigande VMV tyder alltid på en ökad komprimering av lagret. Ett stillastående eller sjunkande VMV är inte lika entydigt. Men har ingen ökning av mätvärdet åstadkommit under de 3 - 4 senaste överfarterna med välten kan det anses att ringa eller obetydligt ökad komprimering kan åstadkommas med ytterligare vältoverfarter.

Ett undantag är om välten börjar dubbelslå, vilket leder till lägre och inte jämförbart VMV.

7. Acceptanskontroll

Yttäckande packningskontroll i kombination med reducerad punktkontroll ($n = 2$) får användas för acceptanskontroll enligt VÄG 94.

Kravet i VÄG 94 är ställt antingen på bärighet (Ev2) eller packningsgraden i konstruktionen. Kravet på bärigheten (Ev2) kombineras med krav på bärighetskvot (Ev2/Ev1).

Kalibrering före packning är inte nödvändig, då vältnätaren för acceptanskontrollen endast utnyttjas för att peka ut de två svagaste ytorna. Dessa ytor skall ha en sammanhängande area på ca 10 m². Med svaga ytor menas här de ytor som ger lägsta VMV. Inom dessa två ytor sker acceptanskontrollen med punktmetoder. En kontrollpunkt läggs i centrum av vardera ytan. Medelvärde av de två punkterna jämförs med det uppställda gränsvärdet.

Den ca 10 m² stora ytan får inte innehålla mätvärden bildade vid sk dubbelslag. Ytor närmast krönkanten bör undvikas. Ytor som ligger ovanpå trummor och broar skall inte användas.

7.1 Packningsutförande

Vid utförande bör följande beaktas:

- Vältens körriktning bör helst vara densamma vid mätning. I annat fall bör skillnaden i mätvärdet mellan framåt- och bakåtkörning fastställas och hänsyn till detta tas vid värdering.

- På bankar skall mätriktningen i de båda yttre stråken helst väljas så, att accelerometern sitter på den sida som är vänd från slänten.
- Mätvärde bildat vid "dubbelslag" är obrukbart om detta inte automatiskt korrigeras av mätsystemet. Dubbelslag skall därför noteras och dessa ytor skall inte användas för acceptanskontroll.
- Överytan på lagret som skall provas måste vara så jämn att valsen ligger an mot underlaget.

8. Egenkontroll

Yttäckande packningskontroll kan med fördel användas som egenkontroll. Med registrering av yttäckande packning, efter kalibrering av VMV mot packningsgrad eller deformationsmodul, minskas risken för att ett kontrollobjekt inte accepteras. Föraren får dessutom uppgift om när kravet troligen är uppfyllt eller när ytterligare packning ger liten effekt.

Kalibrering av VMV bör därför göras mot packningsgrad respektive deformationsmodul.

Kalibreringsytan skall spegla giltighetsområdet, dvs giltighetsområdets materialsammansättning, undergrundens fasthet och materialets vattenkvot måste i huvudsak återfinnas inom kalibreringsytans lager.

Utförande av kalibrering se bilaga.

8.1 Packningsutförande

Förutom vad som angetts under 7.1 skall hänsyn tas till följande:

- De drifttekniska parametrarna för provvälten måste överensstämma med de som används vid kalibrering.
- Vid indirekt mätning av packningsgrad, dvs VMV kalibrerat mot packningsgrad, måste undergrundens fasthet, materialsammansättning och vattenkvot (fin- och blandkorniga jordar) överensstämma med förhållandena vid kalibreringen. Detta gäller även då VMV kalibrerats mot deformationsmodulen (E_{v2}), men här kan större variationer tillåtas.
- Vid kraftigt regn skall provningsöverfarter inte utföras på bland- och finkorniga material. Genomfuktade skikt nära ytan förändrar det dynamiska mätvärdet så att kalibreringsvärdet inte är användbart.
- Underskrids gränsvärdena på delområden bör dessa efterpackas.

9. Rapport

Vid provningar skall för varje kontrollobjekt/provyta föras protokoll där följande uppgifter skall anges:

1. Beskrivning av objektet	objektbeskrivning
2. Beskrivning av provytan	lager, stråkbredd
3. Använd utrustning	provning svält (typ och linje- last), mätsystem, registreringsutrustning
4. Koordinater för vältposition	startposition, sidoläge
5. Vältparametrar	amplitud, hastighet, frekvens
6. Kontinuerlig registrering	mätvärde, position (läge), hastighet, frekvens, (dubbelslag)
7. Övriga anmärkningar	väder, lutning mm.

Bilaga - Kalibrering av vältmätare

Allmängiltiga grundsatser

Genom kalibrering av vältmätaren kan man:

- fastställa ett minimivärde för VMV gentemot det i bygghandlingarna erfordrade resultatkravet (packningsgrad, Ev2)
- från VMV förutsäga packningsresultatet i form av Ev2 eller packningsgraden

Vid valet av plats för kalibrering skall hänsyn tas till att förhållandena (randvillkoren) gäller för de ytor som skall kontrolleras.

Allmänt gäller att det är enklare att finna ett samband mellan VMV och deformationsmodulen (Ev2) än mellan VMV och komprimerings-resultatet (packningsgraden).

Villkor för kalibrering

Vid beräkning av kalibreringsfunktionen antas att ett linjärt samband råder mellan den oberoende variabeln x och den beroende variabeln y enligt:

$$y = a + b x$$

Korrelationskoefficienten r är ett mått på styrkan i det linjära sambandet. Om $r < 0,6$ så är sambandet för svagt för att användas för att ta fram ett minimivärde för vältmätaren. Kalibreringen måste då förbättras genom ytterligare mätningar eller hela förfarandet göras om.

Uppnås ändå inte $r \geq 0,6$ är denna metod inte lämplig för packningskontroll på det aktuella lagret.

Giltighet för kalibrering

Kalibrering är endast giltig då väsentliga förhållanden (randvillkor) såsom materialegenskaper, mätvalsen, mätsystemet och liggtiden överensstämmer mellan kalibreringsytan och kontrollobjekten.

De viktigaste randvillkoren är :

- Materialtyp
- Vattenkvot för bland- och finkorniga jordar
- Tjocklek på det provade lagret
- Den dynamisk styvheten hos lagret under det packade lagret
- Valstyp, med maskintekniska inställningar såsom t ex frekvens, amplitud, hastighet och riktning
- Mätsystem för att bestämma VMV
- Liggtid sedan lagret har packats (gäller kohesionsbenägna jordar, inte överbyggnad).

Om mätutrustningen repareras eller delar av den byts ut måste kalibreringen göras om.

Kalibrering mot konventionella mätmetoder måste genomföras i direkt anslutning till den dynamiska provningen, eftersom en längre liggtid kan förändra terrassens tillstånd.

Kalibreringsyta

Kalibreringsytan skall ligga i väglinjen. Underlaget för kalibreringsytan måste ha tillräcklig bärighet och den skall vara så likartad de framtida kontrollobjektens underlag som möjligt. Områden med höga eller låga VMV på underlaget skall avgränsas och uteslutas vid kalibrering.

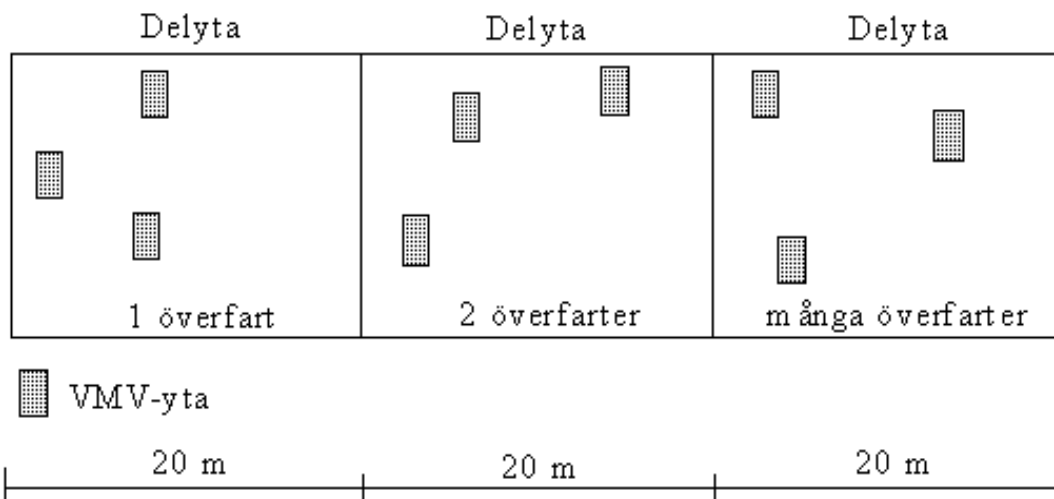
Kalibreringsytan måste omfatta minst 3 delytor med en längd på 20 m vardera, som packas med en varierande packningsinsats.

På detta sätt uppnås största möjliga variation på egenskaperna, packningsgrad eller deformationsmodul hos det packade materialet.

På bankar skall de yttre liggande stråken inte användas vid kalibrering.

En lämplig uppdelning av kalibreringsytorna är:

- Lätt packat (1 överfart med mätvals).
- Medelpackat (2 överfarter med packningsvalsen och 1 överfart med mätvals).
- Mycket packat (packat till dess att tillväxten av VMV har avstannat).



Figur 1. Kalibreringsyta

Utförande av kalibreringsmätning

Det av välten uppmätta värdet motsvarar ett medelvärde över egenskaperna på en yta av ca 1 - 3 m² (VMV-yta). Det skall vara möjligt att noggrant lokalisera denna yta.

Endast VMV-ytor där mätvärdet inte visar på stora avvikelser gentemot närliggande ytor är lämpliga till kalibrering. Skillnaden bör inte vara större än 10 %. På dessa VMV-ytor skall göras minst en, helst flera bestämningar av packningsgrad eller deformationsmodul (Ev2)

För att kunna göra en kalibreringskurva måste minst tre VMV-ytor provas på varje delyta, så att regressionsanalys kan göras på mätningar från samtliga delytor, tillsammans minst 9 punkter.

Densitetsmätning och beräkning av packningsgrad görs enligt VV MB 36 "Tung instampning", VVMB 605 "Bestämning av densitet och vattenkvot med isotopmätare" samt VVMB 607 "Bestämning av maximal densitet med vibrobord".

Bestämning av deformationsmodulen (Ev2) görs enligt VVMB 606 "Bestämning av bärighetsegenskaper med plattbelastning".

Beräkning av kalibreringsfunktion

Vid beräkning av sambandet mellan vältmätarvärden och packningsgrad eller deformationsmodul (Ev2) söks sambandet:

$$y = a + b \cdot x \quad (1)$$

Ekvation (1) används för att kunna sätta ett minimivärde för VMV med utgångspunkt från ett erforderligt gränsvärde uttryckt som Ev2 eller packningsgrad.

Om packningsresultatet skall förutsägas utifrån ett VMV används formel:

$$x = c + d \cdot y \quad (2)$$

Där

x = packningsgrad eller Ev2 för VMV-ytan

y = VMV

a, b, c, d = konstanter som beskriver de räta linjerna för sambandet

\bar{x} = medelvärde för packningsgrad eller Ev2 över kalibreringsytan

\bar{y} = medelvärde för VMV över kalibreringsytan

Då följer att :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad \text{där} \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$c = \bar{x} - d \cdot \bar{y} \quad \text{där} \quad d = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

Vid praktisk användning av vältmätaren som metod och för att handha skillnaden mellan de båda regressionslinjerna kan man använda sig av det aritmetiska medelvärdet av dessa, se figur 2.

Den aritmetiska medelvärdeslinjen kan skrivas som formel (6) och beräknas enligt formlerna (7) och (8).

$$y = e + f \cdot x \quad (6)$$

där

$$f = \frac{1}{2} \left(b + \frac{1}{d} \right) \quad (7)$$

$$e = \bar{y} - f \cdot \bar{x} \quad (8)$$

Alternativt kan det geometriska medelvärdet användas enligt formel (9)

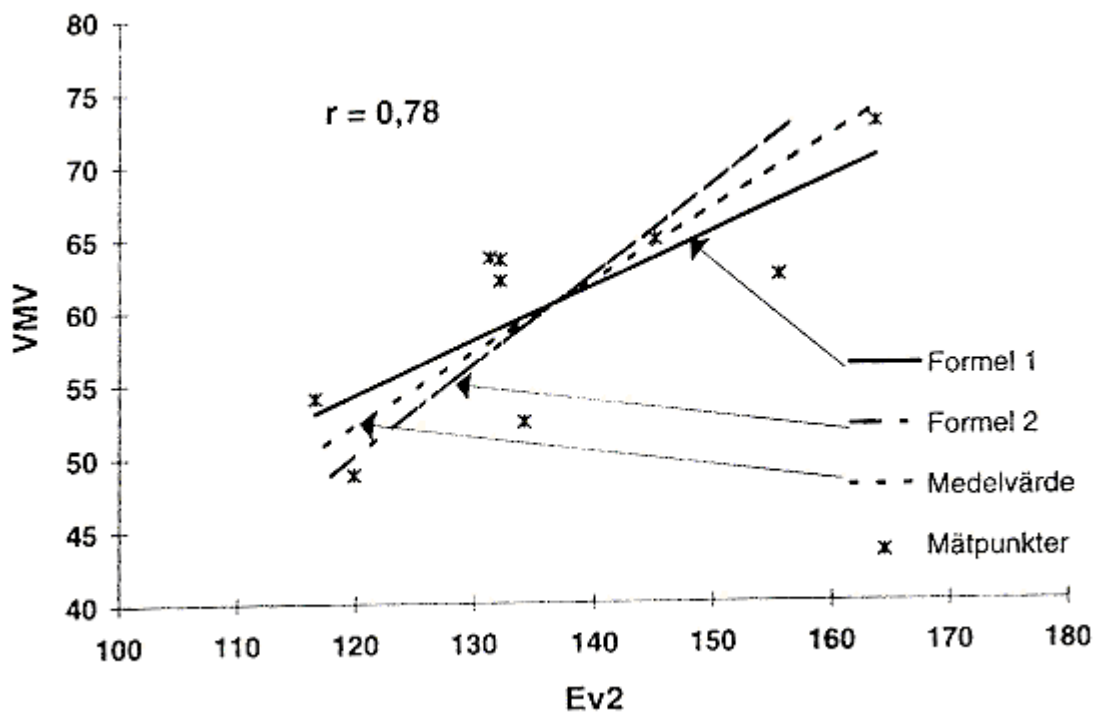
$$f = \sqrt{\frac{b}{d}} \quad (9)$$

Korrelationskoefficienten r är ett mått på sambandet och beräknas enligt följande:

$$r = b \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (10)$$

där

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (11)$$



Figur 2 Exempel på genomförd kalibrering