

A construction site at sunset. A crane is lifting a large concrete slab. Two workers are visible on the site. The sun is low on the horizon, creating a warm orange glow.

Betoniperheet ja valvontakorttimenettely

ELI

Vaatimustenmukaisuuden osoittaminen lujuuden suhteen

Johanna Tikkanen, TkT, Suomen
Betoniyhdistys ry

Betonin puristuslujuus

Betonin puristuslujuuden vaatimustenmukaisuutta valvotaan ja arvioidaan tuotannon yhteydessä standardien mukaisilla menetelmillä.

Rakenteen mitoista, valutavasta, tiivistyksestä, jälkihoidosta ja ympäristöolosuhteista johtuen rakenteissa olevan betonin lujuus voi todellisuudessa poiketa standardien mukaisten testien tuloksista.

Näytteenotto vaatimustenmukaisuustestejä varten suoritetaan sellaisessa paikassa, että betonin oleelliset ominaisuudet ja koostumus eivät merkittävästi muutu näytteenottopaikan ja betonin toimituspaikan välillä.



Betoniperheen muodostaminen

Betonin vaatimustenmukaisuuden osoittamista varten betonin valmistaja muodostaa tuotannostaan betoniperheitä. Betoniperhe koostuu perheenjäsenistä eli eri betonikoostumuksista.

- Yhdeksi perheenjäseneksi katsotaan betonikoostumus, jonka ominaisuuksia, kuten tavoitelujuutta ja -notkeutta, pyritään pitämään mahdollisimman vakiona arvostelujakson ajan.
- Betoniperheen muodostaminen tehdään tehdaskohtaisesti.



A construction site at sunset. A large concrete bucket is being lowered by a crane. Two workers in hard hats are visible on the construction platform. The sky is a mix of orange and red, with a large, bright sun on the right side. The overall scene is silhouetted against the bright sky.

Saman perheen jäsenten tulee täyttää seuraavat ehdot:

- Sementti on tyypiltään, lujuusluokaltaan ja alkuperältään yhdenmukainen. Saman valmistajan samassa maassa eri tehtaalla valmistamia sementtejä voidaan pitää samana sementtinä, mikäli se teknisesti on perusteltua.
- Kiviainekset ovat toiminallisilta ominaisuuksiltaan samankaltaisia.
- Seosaine on sama.
- Lisäaineet eivät merkittävästi vaikuta lujuuteen.
- Arvosteluikä on sama.
- Lujuusluokat eivät liiaksi poikkea toisistaan.

Betoniperheen muodostaminen

Betoniperheen käytöllä on tarkoitus tehostaa betonin valmistuksen laadunvalvontaa. Siksi on tärkeää, että yhdessä betoniperheessä tapahtuvat laatumuutokset ovat riippuvaisia mahdollisimman harvoista tekijöistä. Näin perheen tulosten hajonta on mahdollisimman pieni ja mahdollisten muutosten syyt voidaan tunnistaa.



- 
- A construction site at sunset. A large crane is lifting a heavy concrete slab. Two workers in hard hats are visible on the site. The sky is a mix of orange and red, with a large sun on the right side. The foreground shows the silhouettes of construction equipment and workers.
- Omina betonilaatuinaan tai eri perheinä tulee käsitellä betonit, joiden sisältämällä lisäaineilla voi olla vaikutusta puristuslujuuteen. Tällaisia lisäaineita ovat esimerkiksi huokostavat lisäaineet.
 - Tiivistystavaltaan erilaisia betoneja, kuten maakosteita, tärytettäviä tai itsetiivistyviä betoneja, tulee käsitellä omina perheinään.
 - Normaalilujuuksiset betonit (lujuusluokka $\leq$ C50/60) ja korkealujuusbetonit tulee käsitellä omissa perheissään.

Perhe 1 Normaalisti kovettuva rakennebetoni

Arvosteluikä 28 vuorokautta

Sideaine: PLUS -sementti

Lujuusluokat C20/25 ... C50/60

Kiviaineksen ylänimellisraja 8...32 mm

Notkeusluokat S1...S4



Perhe 2 Normaalisti kovettuva IT-betoni

Arvosteluikä 28 vuorokautta

Sideaine: Rapid -sementti + lentotuhka

Lujuusluokat C30/37 ... C50/60

Kiviaineksen ylänimellisraja 8...32 mm



Perhe 3 Hitaasti kovettuva korkealujuusbetoni

Arvosteluikä 91 vuorokautta

Sideaine: Rapid -sementti + silika

Lujuusluokat C55/67

Kiviaineksen ylänimellisraja 16 mm

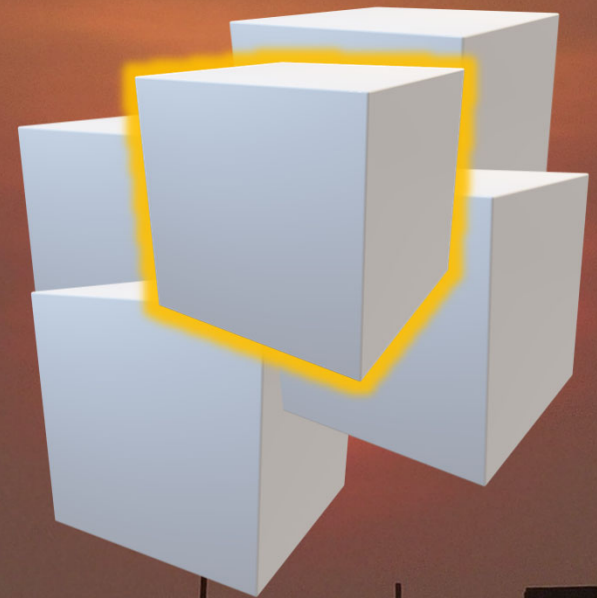
Notkeusluokka S4



Betoniperheen käytöllä on tarkoitus tehostaa betonin valmistuksen laadunvalvontaa. Siksi on tärkeää, että yhdessä betoniperheessä tapahtuvat laatumuutokset ovat riippuvaisia mahdollisimman harvoista tekijöistä. Näin perheen tulosten *hajonta* on mahdollisimman pieni ja mahdollisten muutosten syyt voidaan tunnistaa.



Ennen betoniperhe­käsitteen käyttöönottoa tai käytön laajentamista valvottavien betonilaatujen lujuusominaisuudet tulee tuntea testauksien tai aiempien tuotantotietojen perusteella siten, että saavutetaan riittävä ja tehokas laadunvalvonta ja vaatimustenmukaisuuden toteaminen. Betoniperhettä muodostettaessa perheenjäsenten joukosta valitaan vertailubetoni, jota joko valmistetaan eniten tai joka edustaa perheen keskivertoa.



A construction site at sunset. A large concrete bucket is being lowered by a crane. Two workers in hard hats are visible on the construction platform. The sky is a mix of orange and red, with a large, bright sun on the right side. The overall scene is silhouetted against the bright sky.

Jokaisen yksittäisen betonin ja vertailubetonin **vastaavuus on todettava**. Käytännössä tämä käy parhaiten siten, että betonien tavoitelujuudet toimivat laskelmien perusteina.

- Tutkittavan betonin lujuus muunnetaan vastaamaan vertailubetonin lujuutta vertaamalla tutkittavan betonin puristuslujuustulosta kyseisen betonin tavoitelujuuteen.
- Yksinkertaisimmin muunnettu lujuus saadaan lisäämällä poikkeama vertailubetonin tavoitelujuuteen

Esimerkki

Vertailubetoni C25/30, tavoitelujuus 36,0 MN/m²

Tutkittava betoni C35/45, tavoitelujuus 55,0 MN/m²

Tutkittavan betonin puristuslujuus tulos 53,0 MN/m² jää **2,0 MN/m²** alle tavoitteen

→ Muutettu tulos = $36,0 \text{ MN/m}^2 - 2,0 \text{ MN/m}^2 = 34,0 \text{ MN/m}^2$

TAI

Tutkittavan betonin puristuslujuus tulos 56,4 MN/m² ylittää
1,4 MN/m² tavoitteen

→ Muutettu tulos = $36 \text{ MN/m}^2 + 1,4 \text{ MN/m}^2 = 37,4 \text{ MN/m}^2$



A construction site at sunset. A crane is lifting a large, dark, rectangular concrete slab. Two workers in hard hats are visible on the construction platform. The sky is a mix of orange and red, with a large, bright sun on the right side. The overall scene is silhouetted against the bright sky.

Vaihtoehtoinen tapa muuttaa lujuustulokset vastaamaan toisiaan on käyttää **suhteellista menetelmää**. Menetelmä on suositeltava, jos samaan perheeseen kuuluu lujuusluokiltaan tai tavoitelujuuksiltaan hyvin erilaisia betoneja. Betoniyhdistyksen laskentaohjelma (by 1026 Betoniperheohjelma ja Cusum) käyttää tätä menetelmää. Seuraavassa esitetään edellisen esimerkin tulosten muuttaminen käyttäen tulosten suhteellista muuntamista.

Esimerkki

Vertailubetoni C25/30, tavoitelujuus 36,0 MN/m²

Tutkittava betoni C35/45, tavoitelujuus 55,0 MN/m²

Tutkittavan betonin puristuslujuustulos 53,0 MN/m², joka on 96,4 % tavoitelujuudesta

→ Muutettu tulos = $36,0 \text{ MN/m}^2 * 0,964 = 34,7 \text{ MN/m}^2$

TAI

Tutkittavan betonin puristuslujuustulos 56,4 MN/m², joka on 102,6 % tavoitelujuudesta

→ Muutettu tulos = $36 \text{ MN/m}^2 * 1,026 = 36,9 \text{ MN/m}^2$

Näytteenotto- ja testaussuunnitelma

Näytteenotto- ja testaussuunnitelma sekä betoniperheiden ja yksittäisten jäsenten vaatimustenmukaisuuden ehdot laaditaan erikseen valmistuksen alkuvaiheelle ja jatkuvalle valmistukselle.

- Valmistuksen alkuvaihe päättyy ja jatkuva valmistus alkaa, kun käytettävissä on vähintään 35 testaustulosta enintään 12 kuukauden ajalta.



Vaatimuksenmukaisuuden arvioinnissa voidaan käyttää joko 150 mm:n kuutiotuloksia tai halkaisijaltaan 150 mm:n ja korkeudeltaan 300 mm:n lieriökoekappaleita.

- Käytettäessä 100 mm:n kuutiota tulos muunnetaan vastaamaan 150 mm:n kuutiolujuutta jakamalla tulos kertoimella 1,03.



Alkutestaus ja testien hyväksymisehdot (by 65 kpl 5.2.2.2)

Alkutestauksen keskeinen tarkoitus on määrittää betonin koostumuksen tavoitelujuus. Tavoitelujuus toimii perustana, kun tulokset muunnetaan vastaamaan vertailubetonin lujuutta.

Alkutestauksella tulee myös osoittaa, että betoni täyttää riittävällä marginaalilla kaikkien sen määrittelyssä betonimassalle ja kovettuneelle betonille esitetyt vaatimukset.
Betonin alkutestauksesta vastaa valmistaja.



Yksittäisen betonin alkutestauksessa tulee testata vähintään kolme koekappaletta jokaisesta vähintään kolmesta annoksesta eli yhteensä vähintään yhdeksän koekappaletta.

Betoniperheen alkutestauksessa näytteenottoon valitun perheen jäsenten lukumäärän tulee olla sellainen, että katetaan kaikkien perheeseen kuuluvien betonien koostumukset. Tällöin yhden betonin koekappaleet voidaan tehdä yhdestä annoksesta (3 kpl / annos).



Taulukko 5.2. Tarkastetun valmistuksen näytteiden vähimmäismäärä vaatimustenmukaisuuden arvioinnissa.

Valmistus	Näytteiden vähimmäismäärä	
	Valmistuksen ensimmäiset 50 m ³	Sen jälkeen ^(a) , kun on valmistettu ensimmäiset 50 m ³
Alkuvaihe (kunnes on saatu vähintään 35 testaustulosta)	3 näytettä	1 näyte / 200 m ³ tai 1 näyte / 3 tuotantopäivää
Jatkuva ^(b) (kun käytettävissä on vähintään 35 testaustulosta)		1 näyte / 400 m ³ tai 1 näyte / 5 tuotantopäivää ^(c) tai 1 näyte / kalenterikuukausi

a) Näytteenotto on kohdistettava koko valmistukseen. Näytteiden määrän ei tarvitse kuitenkaan olla suurempi kuin 1 näyte 25 m³:ä kohden.

b) Jos arviointijakson viimeisen 15 tai useamman testaustuloksen keskihajonta ylittää taulukon 5.4 mukaisen s_n :n ylärajat, näytteiden lukumäärää on lisättävä vastaamaan tuotannon alkuvaiheen näytteiden lukumäärää, kunnes on saatu seuraavat 35 testaustulosta.

Vaatimustenmukaisuus arvioidaan kuitenkin edelleen jatkuvan valmistuksen ehdoilla.

c) Tai jos 7 perättäisen kalenteripäivän aikana on yli 5 tuotantopäivää, kerran kalenteriviikossa.

- 
- A construction site at sunset. A large crane is in the center, lifting a heavy concrete slab. Two workers in hard hats are visible on the left, and another worker is on the right. The sky is a mix of orange and red, with a large, bright sun on the right side. The foreground shows the silhouettes of construction equipment and workers.
- Valmistuksen alkuvaihe kattaa valmistuksen siihen saakka, että käytettävissä on vähintään 35 testaustulosta.
 - Jatkuva valmistus alkaa, kun enintään 12 kuukauden aikana on saatu vähintään 35 testaustulosta.
 - Jos yksittäisen betonin koostumuksen tai betoniperheen valmistus on ollut keskeytettynä yli 12 kuukautta, valmistajan on noudatettava valmistuksen alkuvaiheen vaatimustenmukaisuuden ehtoja sekä näytteenotto- ja testaussuunnitelmaa.

Tuotantopäivä

Näytteiden vähimmäismäärää määritettäessä **tuotantopäivä** on päivä, joka täyttää jonkin seuraavista vaihtoehdoista:

- Päivä, jolloin kyseistä perhettä on tuotettu vähintään 25 m³.
- Ajanjakso, jonka aikana edellisen tuotantopäivän jälkeen kyseiseen perheeseen kuuluvia betoneja on yhteensä tuotettu 25 m³.
- Jos 30 päivän aikana on tuotettu kyseiseen perheeseen kuuluvia betoneja, mutta yhteensä vähemmän kuin 25 m³, tuotantopäivä on seuraava päivä, jolloin ko. betonia tuotetaan



Puristuslujuuden vaatimustenmukaisuuden ehdot

Puristuslujuus määritetään 28 vuorokauden ikäisillä koekappaleilla, ellei toisin ole määritetty. Erityisissä käyttökohteissa voi olla tarpeen määrittää puristuslujuus aikaisemmin tai myöhemmin kuin 28 vuorokauden iässä (esim. suurista kantavista elementeistä) tai erityisololoissa tapahtuneen varastoinnin (esim. lämpökäsittelyn) jälkeen.



Tulosvaatimus

Jäsenvaatimus

Perhevaatimus

f_{ck} = nimellisluku (esim C30/37)

Tulosvaatimus: onko jokainen 28 päivän ikäisenä saatu testaustulos yhtä suuri tai suurempi kuin $(f_{ck} - 4)$ (kohta 5.3.1.4, kaava 5.1)?

Ei

Ilmoita tilaajalle, että annos tai kuorma on vaatimustenvastainen.

Kyllä

Jäsenvaatimus: tarkista jokaisesta testatusta perheenjäsenestä jokaisen arviointijakson aikana varmistusehdon mukaisesti, kuuluuko se perheeseen (kohta 5.3.1.4, taulukko 5.2).

Ei

Poista tämä betoni perheestä ja arvioi se yksittäisenä betonina.

Kyllä

Perhevaatimus: onko jokaisen arviointijakson aikana kaikkien muunnettujen lujustulosten keskiarvo suurempi tai yhtä suuri kuin $f_{ck} + 1,48 \sigma$ (kohta 5.3.1.4, kaava 5.3)?

Ei

Ilmoita, että perhe on vaatimustenvastainen arviointijakson aikana.

Kyllä

Ilmoita, että arviointijakson aikana perhe on vaatimustenmukainen.

Kuva 5.1. Betoniperheen jäsenten ja vaatimustenmukaisuuden arviointi.

Tulosvaatimus

Jokaisen yksittäisen testaustuloksen f_{ci} on täytettävä seuraava ehto
(**tulosvaatimus**):

$$f_{ci} \geq (f_{ck} - 4) \text{ MN/m}^2$$

missä

f_{ci} on yksittäinen puristuslujuustulos

f_{ck} on kyseisen betonin nimellislukuus (joko kuutiolukuus tai lieriöluukuus, riippuen kumpia koekappaleita käytetään)).

Vaatimuksen täytymistä on valvottava myös jakson aikana ja mahdollisissa alitustapauksissa on ryhdyttävä välittömästi tarpeellisiin toimenpiteisiin.

Perhevaatimus (alkuvaiheen)

$$f_{cm} \geq (f_{ck} + 4) \text{ MN/m}^2 \quad (5.2)$$

missä f_{cm} on kolmen peräkkäisen muunnetun puristuslujuustuloksen keskiarvo
 f_{ck} on kyseisen betonin nimellisluku.

Kolmen koekappaleen ei-liukuvat ryhmät muodostetaan seuraavasti:

- ryhmä 1 (koekappaleet 1, 2 ja 3)
- ryhmä 2 (koekappaleet 4, 5 ja 6)
- ryhmä 3 (koekappaleet 7, 8 ja 9).

Perhevaatimus (jatkuvan valmistuksen)

Jatkuvan valmistuksen näytteenottotaajuuteen sekä vaatimuksenmukaisuuden arviointiin voidaan siirtyä, kun jatkuvan valmistuksen ehdot on saavutettu, eli kun perheestä on saatu 12 kuukauden aikana vähintään 35 puristuslujuustulosta.

Vaatimustenmukaisuuden arviointi perustuu arviointijakson aikana saatuihin testituloksiin. Arviointijakson pituus määrätään siten, että arviointijaksoon tulee vähintään 15 ja korkeintaan 35 tulosta korkeintaan 6 kuukauden aikana.

Arviointijaksolla betoniperheen muunnettujen lujuuksien keskiarvon on täytettävä seuraava ehto (**perhevaatimus**):

$$f_{cm} \geq (f_{ck} + 1,48 \sigma) \text{ MN/m}^2 \quad (5.3)$$

Keskihajonta σ lasketaan kaavasta

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n}} \quad (5.4)$$

missä	f_{ci}	on yksittäinen koetulos
	f_{cm}	on arvostelujakson aikana saatujen koetulosten keskiarvo
	n	on 35.

Jäsenvaatimus

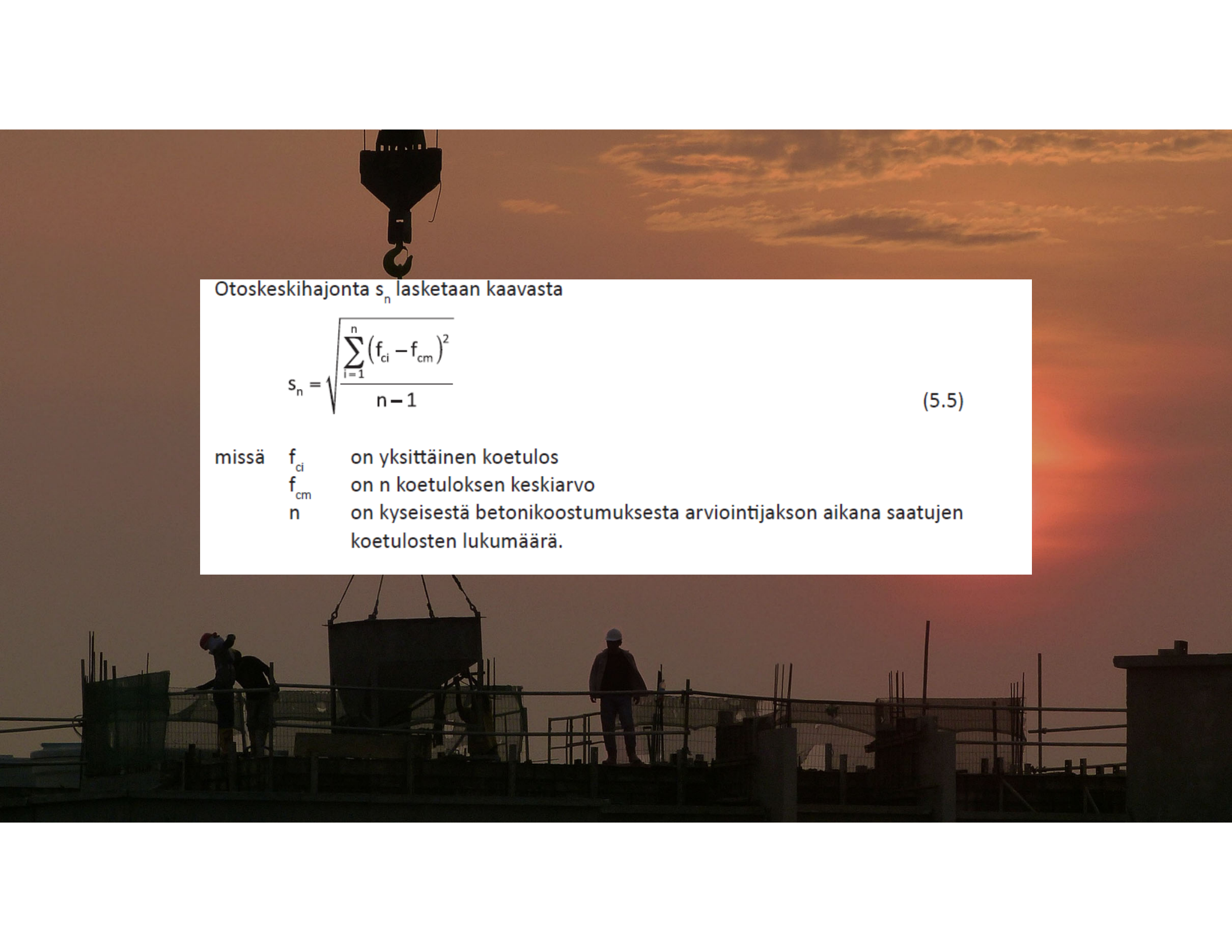
Jokaisen yksittäisen betoniperheenjäsenen kuuluminen betoniperheeseen varmistetaan erikseen siten, että yksittäisen perheenjäsenen kaikkien muuntamattomien testaustuloksien keskiarvoa (f_{cm}) verrataan puristuslujuusehtoon (jäsenvaatimus). Perheestä poistetaan betoni, joka ei täytä tätä ehtoa.

Poistetun betonin vaatimustenmukaisuus arvioidaan erikseen käyttäen valmistuksen alkuvaiheen vaatimustenmukaisuuden ehtoja. Poistettujen betonien liittäminen takaisin betoniperheeseen on sallittua vasta sen jälkeen, kun poistetun betonin ja vertailubetonin koostumusten välinen luotettava yhteys on osoitettu



Jäsenvaatimus

Puristuslujuuden testaustulosten lukumäärä n [kpl] yksittäiselle perheenjäsenelle	n tuloksen keskiarvo (f_{cm}) yksittäiselle perheenjäsenelle MN/m ²
1	$\geq f_{ck} - 4,0$
2	$\geq f_{ck} - 1,0$
3	$\geq f_{ck} + 1,0$
4	$\geq f_{ck} + 2,0$
5	$\geq f_{ck} + 2,5$
6	$\geq f_{ck} + 3,0$
7...9	$\geq f_{ck} + 3,5$
10...12	$\geq f_{ck} + 4,0$
13, 14	$\geq f_{ck} + 4,5$
$n \geq 15$	$\geq f_{ck} + 1,48 s_n$



Otoskeskihajonta s_n lasketaan kaavasta

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n-1}} \quad (5.5)$$

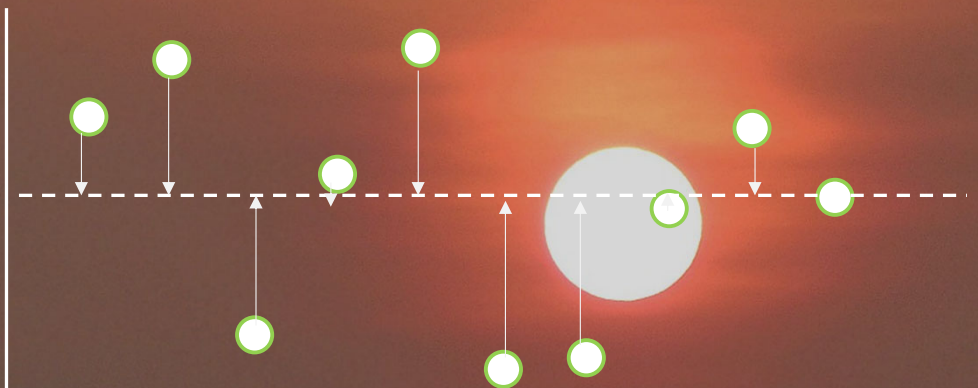
missä f_{ci} on yksittäinen koetulos
 f_{cm} on n koetuloksen keskiarvo
 n on kyseisestä betonikoostumuksesta arviointijakson aikana saatujen koetulosten lukumäärä.

Valmistuksen alkuvaiheen päätyessä perheen muunnettujen tulosten *keskihajonta* (σ) lasketaan ensimmäistä arviointijaksoa edeltävistä viimeisimmistä vähintään 35 peräkkäisestä testaustuloksesta, jotka on otettu yli kolmen kuukauden jaksolla.

Kun jatkuva valmistus alkaa, tätä keskihajontaa käytetään vaatimustenmukaisuuden tarkistamisessa ensimmäisellä arviointijaksolla.

Arviointijaksojen päätyessä tarkistetaan, onko keskihajonta muuttunut merkitsevästi käyttäen taulukossa esitettyjä raja-arvoja:

- Jos keskihajonta ei ole muuttunut merkitsevästi, samaa keskihajontaa käytetään seuraavalla arviointijaksolla.
- Jos keskihajonta on muuttunut merkitsevästi, lasketaan uusi keskihajonta uusimmista 35 peräkkäisestä tuloksesta ja tätä keskihajontaa käytetään seuraavalla arviointijaksolla.

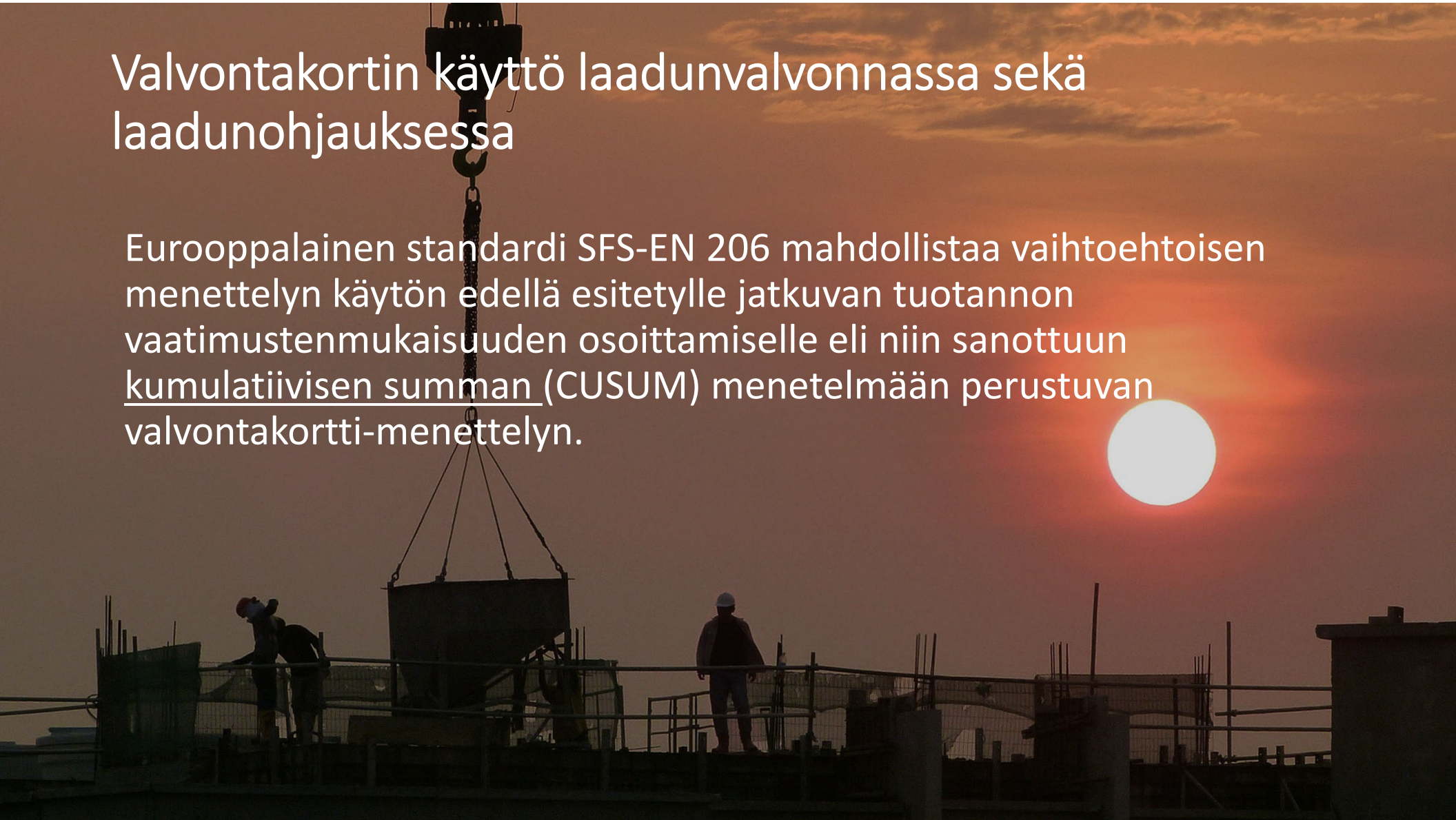


Taulukko 5.4. Ehto, jolla tarkistetaan, onko keskihajonta jakson aikana muuttunut merkittävästi.

Perheestä arviointijakson aikana saatujen testaustulosten lukumäärä n [kpl]	s_n :n raja-arvot
15...19	$0,63 \sigma \leq s_n \leq 1,37 \sigma$
20...24	$0,68 \sigma \leq s_n \leq 1,31 \sigma$
25...29	$0,72 \sigma \leq s_n \leq 1,28 \sigma$
30...34	$0,74 \sigma \leq s_n \leq 1,26 \sigma$
≥ 35	$0,76 \sigma \leq s_n \leq 1,24 \sigma$

Valvontakortin käyttö laadunvalvonnassa sekä laadunohjauksessa

Eurooppalainen standardi SFS-EN 206 mahdollistaa vaihtoehtoisen menettelyn käytön edellä esitetylle jatkuvan tuotannon vaatimustenmukaisuuden osoittamiselle eli niin sanottuun kumulatiivisen summan (CUSUM) menetelmään perustuvan valvontakortti-menettelyn.



A construction site at sunset. A large crane is in the center, lifting a heavy object. Two workers are visible on the left, and another worker is on the right. The sky is a mix of orange and red, with a large, bright sun on the right side. The foreground shows the silhouettes of construction equipment and workers.

Menettely poikkeaa jatkuvan tuotannon vaatimustenmukaisuuden osoittamisesta seuraavasti:

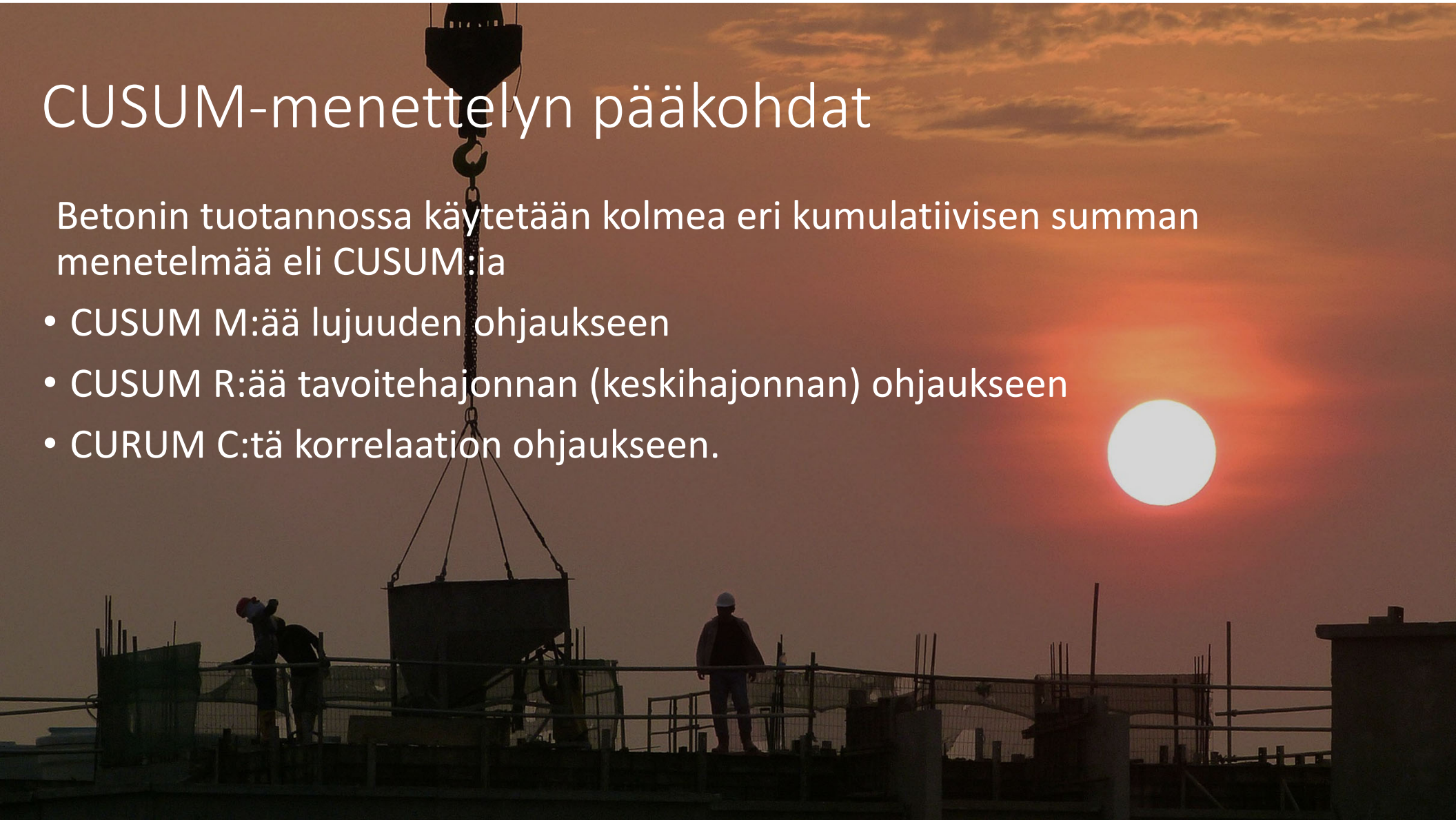
- **Tulosvaatimusta** noudatetaan
- **Perhevaatimuksen** täyttymistä ei seurata
- **Jäsenvaatimusta** ei seurata

Vaatimustenmukaisuutta ei arvioida arvostelujaksoittain vaan vaatimustenmukaisuus todetaan reaaliaikaisesti (jatkuvasti) aina viimeisimmän tuloksen kirjauksen yhteydessä.

CUSUM-menettelyn pääkohdat

Betonin tuotannossa käytetään kolmea eri kumulatiivisen summan menetelmää eli CUSUM:ia

- CUSUM M:ää lujuuden ohjaukseen
- CUSUM R:ää tavoitehajonnan (keskihajonnan) ohjaukseen
- CURUM C:tä korrelaation ohjaukseen.



CUSUM M

CUSUM M on työkalu betonin laadun ja lujuuden ohjaukseen. Menetelmän tarkoituksena on seurata betoniperheen lujuustuloksissa tapahtuvaa muutosta ja reagoida muutoksiin ajoissa ennen kuin vaatimuksenmukaisuuden asettamat ehdot ylittyvät.



CUSUMin perusajatus

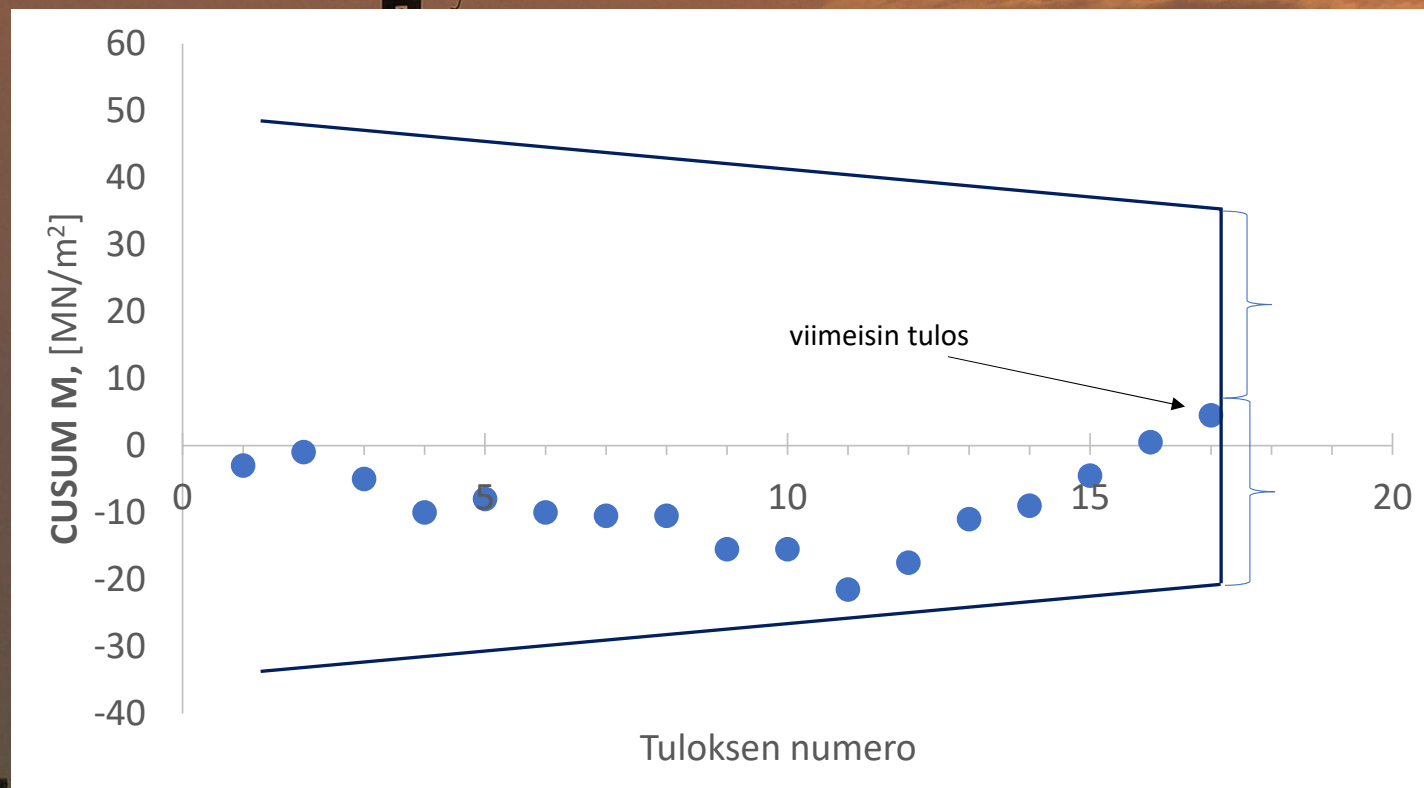
Laadunvalvonnassa saadun puristuslujuustuloksen (muunnettu lujuus) poikkeamaa tavoitelujuudesta seurataan ja poikkeamien summat lasketaan yhteen (CUSUM = kumulatiivinen summa).

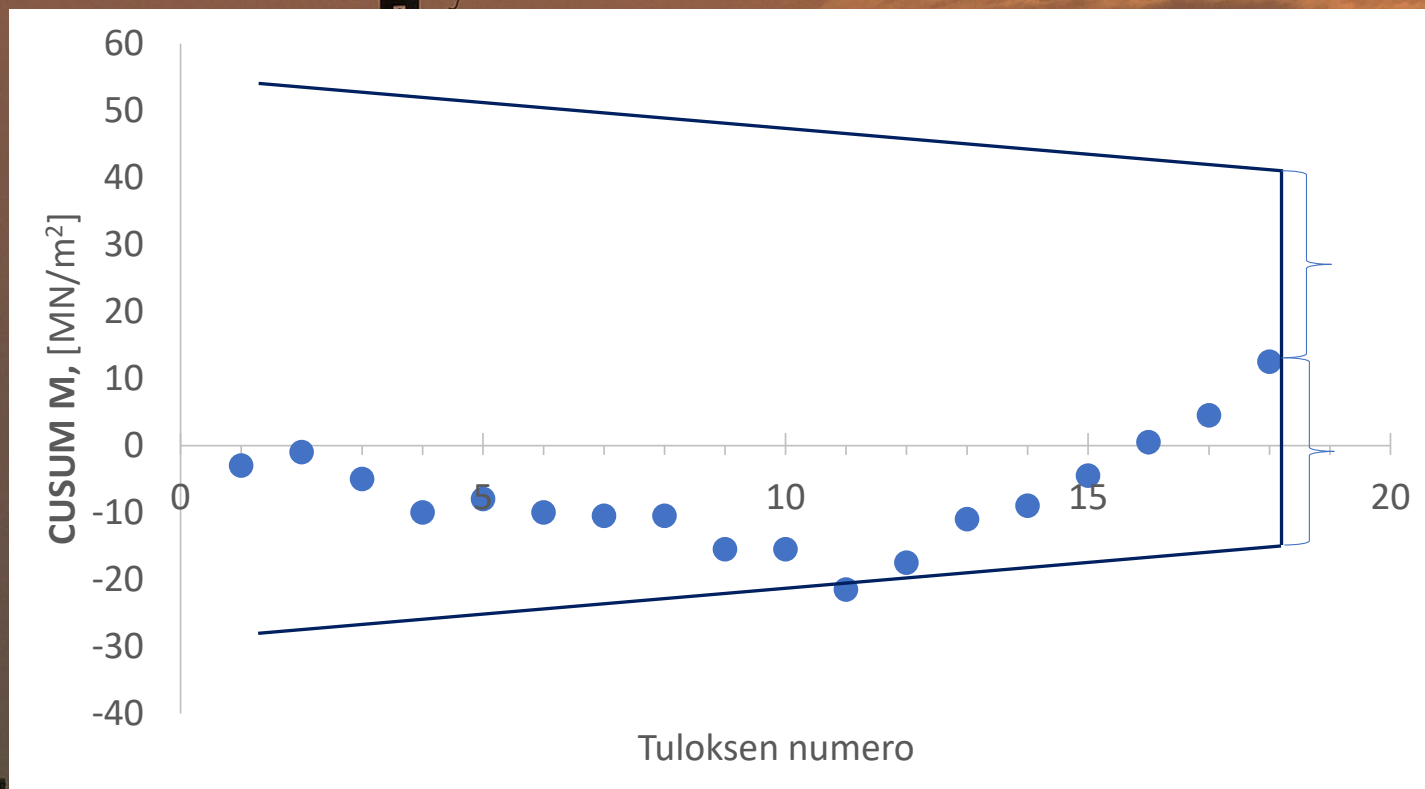
Summan kehittymistä seurataan graafisessa esityksessä.

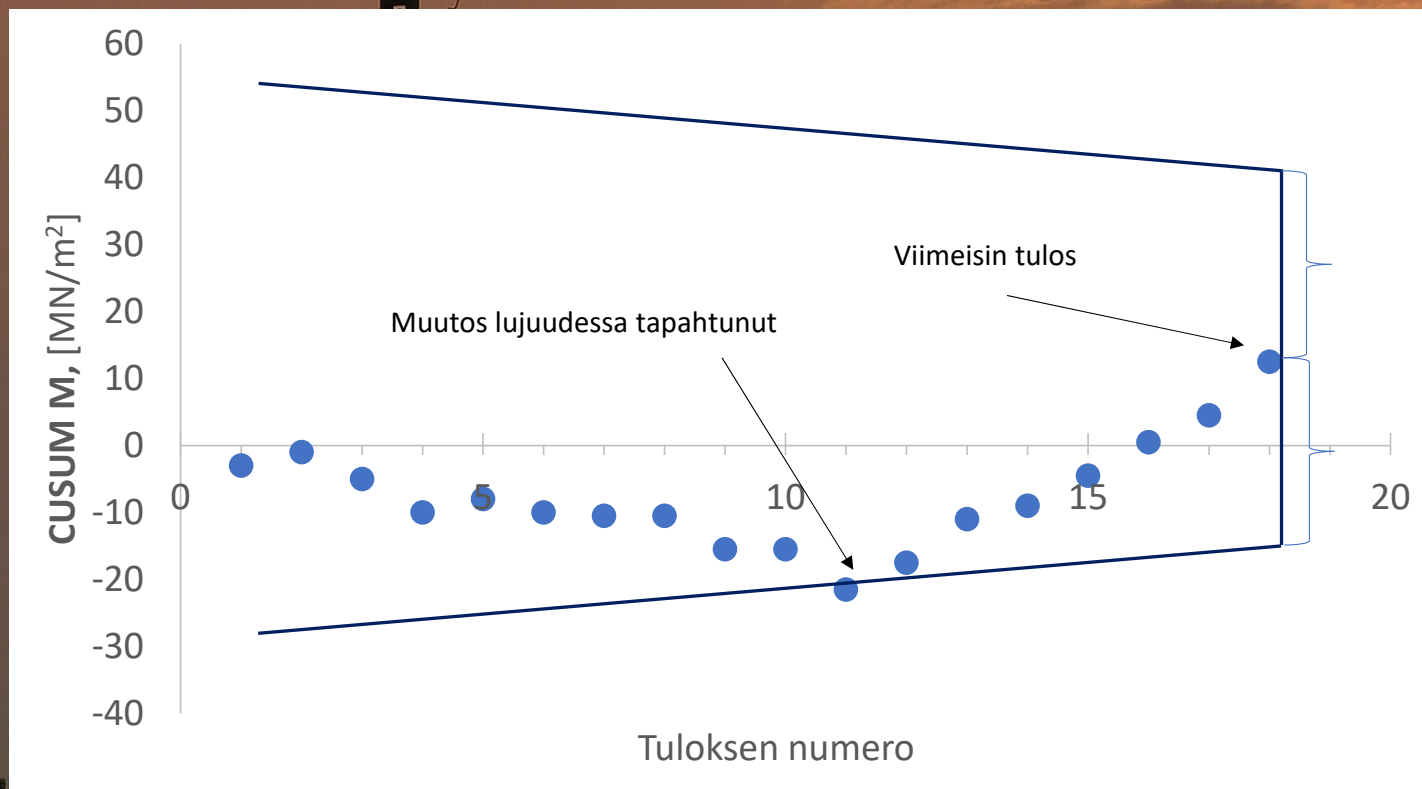


Esimerkki: betoni tavoitelujuus 40 N/mm²

Tulos	28 vrk puristus-lujuus [MN/m ²]	Poikkeama tavoitteesta [MN/m ²]	Kumulatiivinen summa CUSUM M [MN/m ²]
1	37	-3	-3
2	42	2	-1
3	36	-4	-5
4	35	-5	-10
5	42	2	-8
6	38	-2	-10
7	39,5	-0,5	-10,5
8	40	0	-10,5
9	35	-5	-15,5
10	40	0	-15,5
11	34	-6	-21,5
12	44	4	-17,5
13	46,5	6,5	-11
14	42	2	-9
15	44,5	4,5	-4,5
16	45	5	0,5
17	44	4	4,5
18	48	8	12,5







A construction site at sunset. A crane is lifting a large, dark, rectangular concrete slab. Two workers in hard hats are visible on the construction platform. The sky is a deep orange and red, with a large, bright sun on the right side. The overall scene is silhouetted against the bright sunset.

CUSUM-kuvaajaan on yhdistetty ylä- ja alapuoliset hälytysrajat eli niin sanottu V-maski.

Jos laatu on hallinnassa, pisteet CUSUM-kuvaajassa ovat jakautuneet satunnaisesti (positiiviset ja negatiiviset tulokset "kumoavat" toisensa), ja kumulatiivinen summa pysyttelee lähellä nollaa.

Jos laadussa on puutteita, kumulatiivinen summa alkaa lähestyä nopeasti ylempää tai alemmaa hälytysrajaa.

A construction site at sunset. A crane is lifting a large, dark, rectangular concrete slab. Two workers in hard hats are visible on the construction platform. The sky is a deep orange and red, with a large, bright sun on the right side. The silhouettes of the construction equipment and workers are visible against the bright sky.

V-maski on nimensä mukaisesti katkaistun V:n mallinen. Betoniperheen tavoitehajonta (σ) määrittää V-maskin ”pohjan” etäisyyden viimeksi saadusta tuloksesta sekä V-maskin kulmakertoimen.

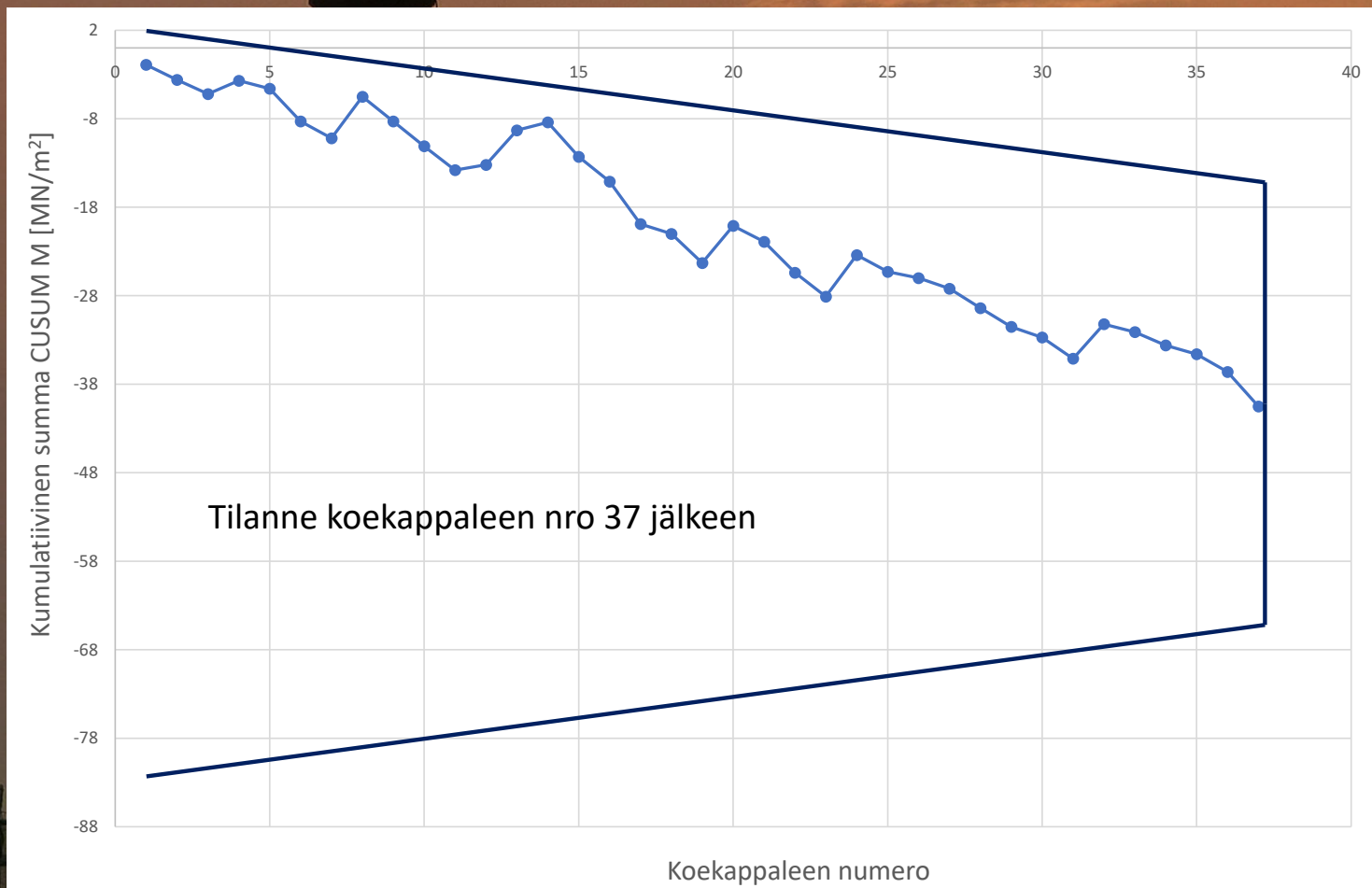
Näin V-maskin sekä ylä- ja alapuolisten hälytysrajojen sijainti siirtyy jokaisen viimeisimmän tuloksen mukana.

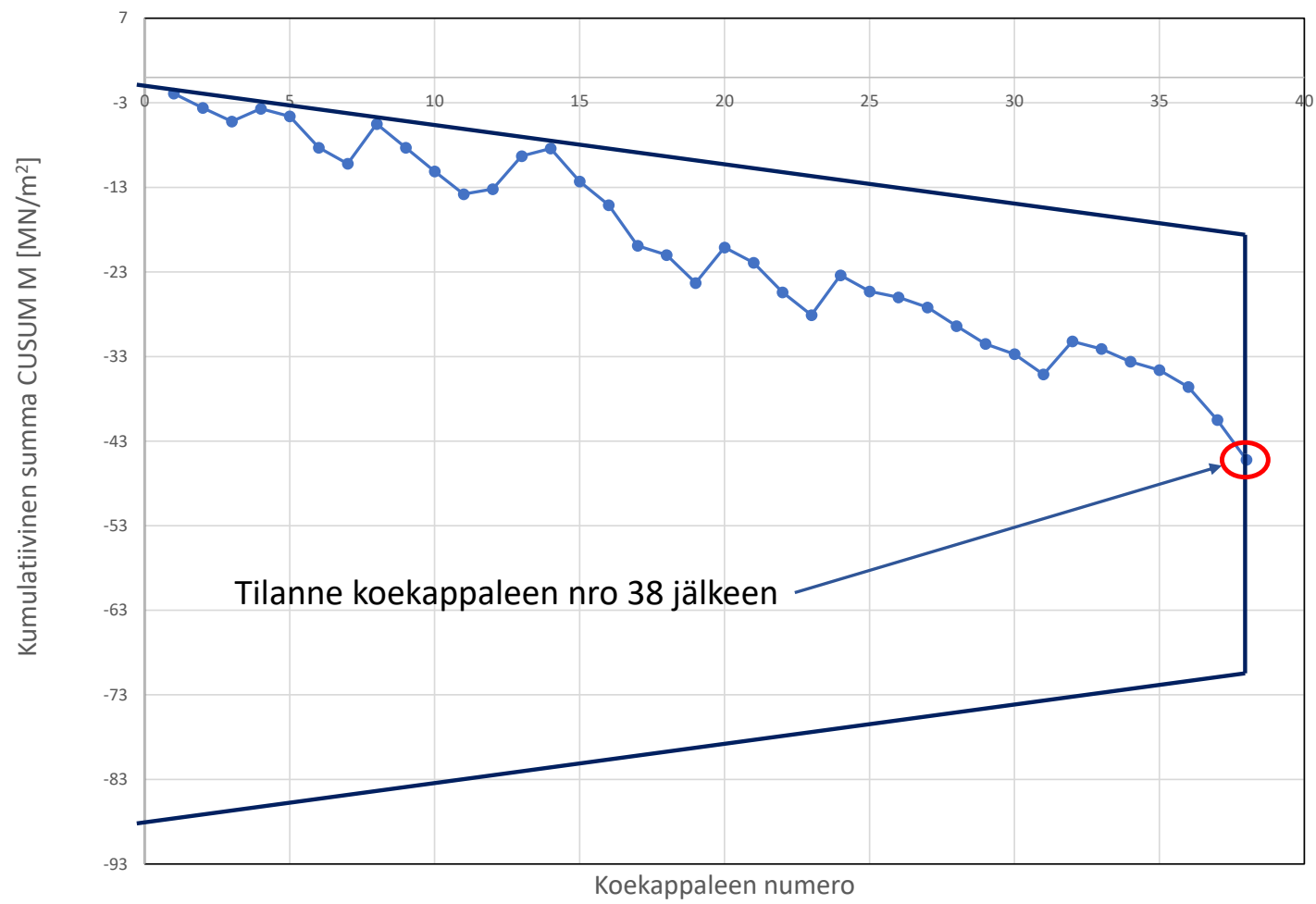
A construction site at sunset. A crane is lifting a large, dark, rectangular object. Two workers in hard hats are visible on the construction platform. The sky is a deep orange and red, with a large, bright sun on the right side. The overall scene is silhouetted against the bright sunset.

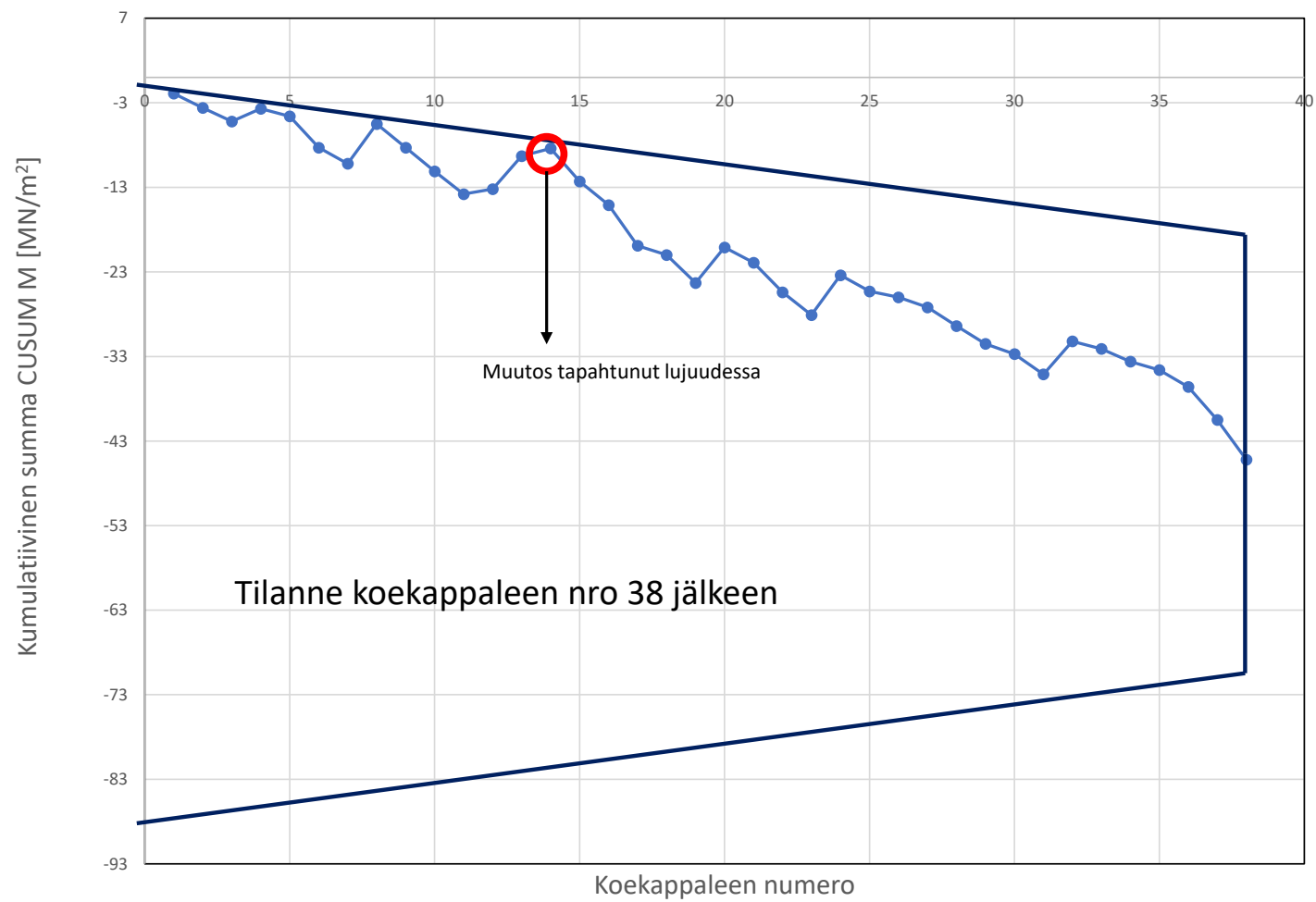
Summaa kerrytetään niin kauan, kunnes
summakäyrä risteää hälytysrajan kanssa.
Leikkauksen tapahduttua järjestelmä
ilmoittaa puristuslujuuden poikkeavan
tavoitellusta siten, ettei poikkeamaa voi enää
selittää satunnaisella hajonnalla, *vaan*
lujuudessa on tapahtunut systemaattinen
muutos, joka tulee korjata.

Piste, jonka kanssa hälytysraja risteää, kertoo
tuloksen, jonka kohdalla muutos lujuudessa
on alkanut.

Tulos	Resepti	Lujuus-luokka	Tavoitelujuus [MN/m ²]	Mitattu lujuus [MN/m ²]	Muunnettu lujuus [MN/m ²]	Poikkeama tavoitteesta [MN/m ²]	CUSUM [MN/m ²]
1	101	C30/37	44	42,1	42,1	-1,9	-1,9
2	101	C30/37	44	42,3	42,3	-1,7	-3,6
3	102	C30/37	48	46,3	42,4	-1,6	-5,2
4	101	C30/37	44	45,5	45,5	1,5	-3,7
5	103	C35/45	55	53,8	43	-1	-4,6
6	101	C30/37	44	40,3	40,3	-3,7	-8,3
7	104	C40/50	62	59,3	42,1	-1,9	-10,2
8	101	C30/37	44	48,7	48,7	4,7	-5,5
9	103	C35/45	55	51,5	41,2	-2,8	-8,3
10	101	C30/37	44	41,2	41,2	-2,8	-11,1
11	104	C40/50	62	58,2	41,3	-2,7	-13,8
12	101	C30/37	44	44,6	44,6	0,6	-13,2
13	102	C30/37	48	52,3	47,9	3,9	-9,3
14	101	C30/37	44	44,9	44,9	0,9	-8,4
15	103	C35/45	55	50,1	40,1	-3,9	12,3
16	101	C30/37	44	41,2	41,2	-2,8	-15,1
17	101	C30/37	44	39,2	39,2	-4,8	-19,9
18	104	C40/50	62	60,5	42,9	-1,1	-21
19	102	C30/37	48	44,4	40,7	-3,3	-24,3
20	101	C30/37	44	48,2	48,2	4,2	-20,1
21	101	C30/37	44	42,2	42,2	-1,8	-21,9
22	102	C30/37	48	44,1	40,4	-3,6	-25,4
23	104	C40/50	62	58,3	41,4	-2,6	-28,1
24	101	C30/37	44	48,7	48,7	4,7	-23,4
25	101	C30/37	44	42,1	42,1	-1,9	-25,3
26	102	C30/37	48	47,2	43,3	-0,7	-26
27	101	C30/37	44	42,8	42,8	-1,2	-27,2
28	101	C30/37	44	41,8	41,8	-2,2	-29,4
29	103	C35/45	55	52,4	41,9	-2,1	-31,5
30	101	C30/37	44	42,8	42,8	-1,2	-32,7
31	102	C30/37	48	45,4	41,6	-2,4	-35,1
32	101	C30/37	44	47,9	47,9	3,9	-31,2
33	101	C30/37	44	43,1	43,1	-0,9	-32,1
34	104	C40/50	62	59,8	42,4	-1,6	-33,6
35	101	C30/37	44	43	43	-1	-34,6
36	101	C30/37	44	42	42	-2	-36,6
37	101	C30/37	44	40,1	40,1	-3,9	-40,5
38	103	C35/45	55	49,2	39,4	-4,6	-45,2







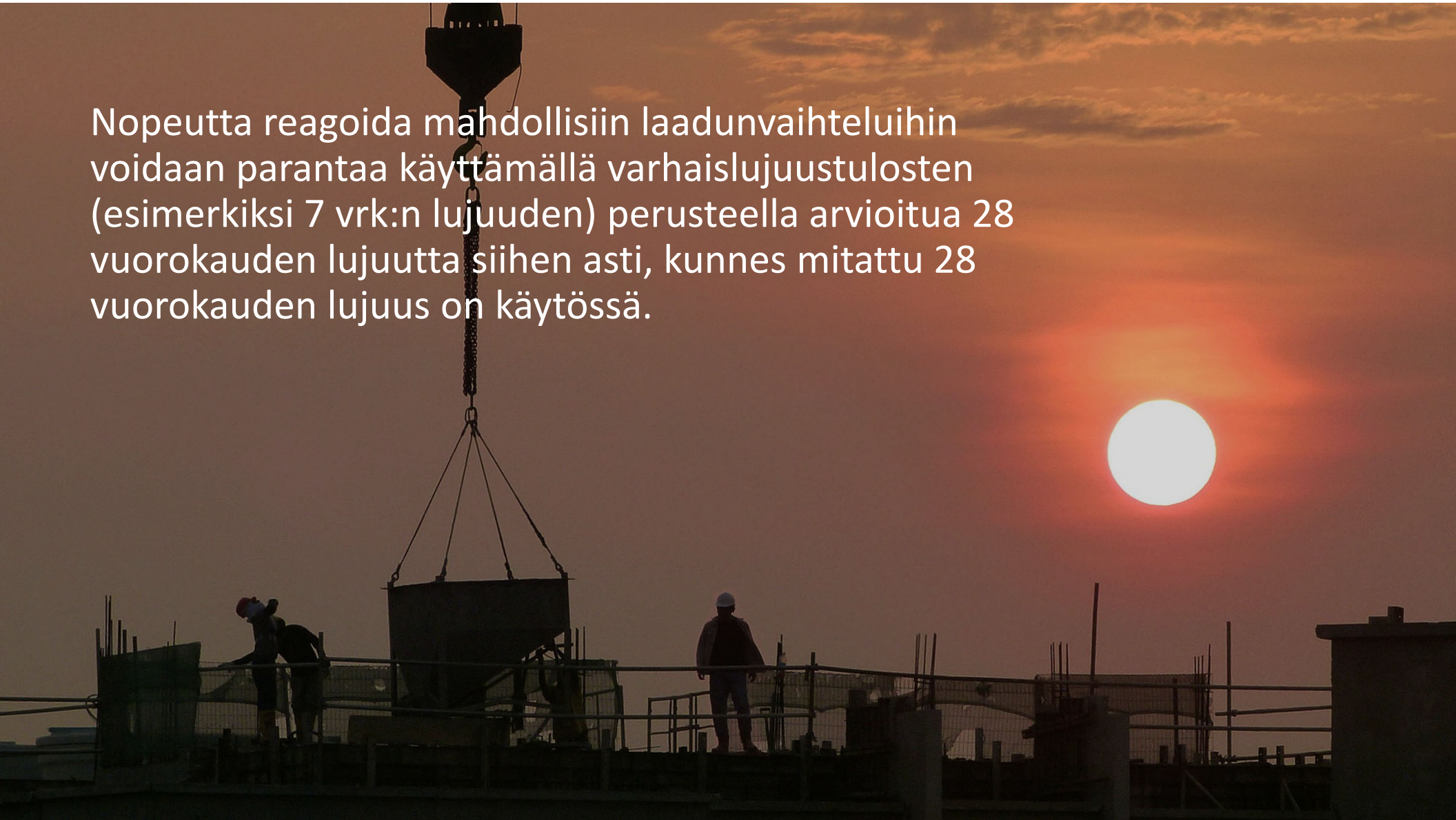
A construction site at sunset. A crane is lifting a large, dark, rectangular concrete slab. Two workers in hard hats are visible on the construction platform. The sky is a mix of orange and red, with a large, bright sun on the right side. The overall scene is silhouetted against the bright sky.

Ylemmän hälytysrajan ylitys kertoo lujuuden olevan systemaattisesti tavoitelujuutta alhaisempi.

Alemman hälytysrajan alittaminen taas kertoo tavoitelujuuksien systemaattisesta ylittymisestä.

- Tavoitelujuuden saavuttamiseksi lujuutta on joko nostettava tai laskettava esimerkiksi sementin määrää muuttamalla.
- Tehdyn muutoksen jälkeen CUSUM M nollaantuu (nollataan) ja lujuuden seuranta aloitetaan nollatasolta.

Nopeutta reagoida mahdollisiin laadunvaihteluihin voidaan parantaa käyttämällä varhaislujuustulosten (esimerkiksi 7 vrk:n lujuuden) perusteella arvioitua 28 vuorokauden lujuutta siihen asti, kunnes mitattu 28 vuorokauden lujuus on käytössä.



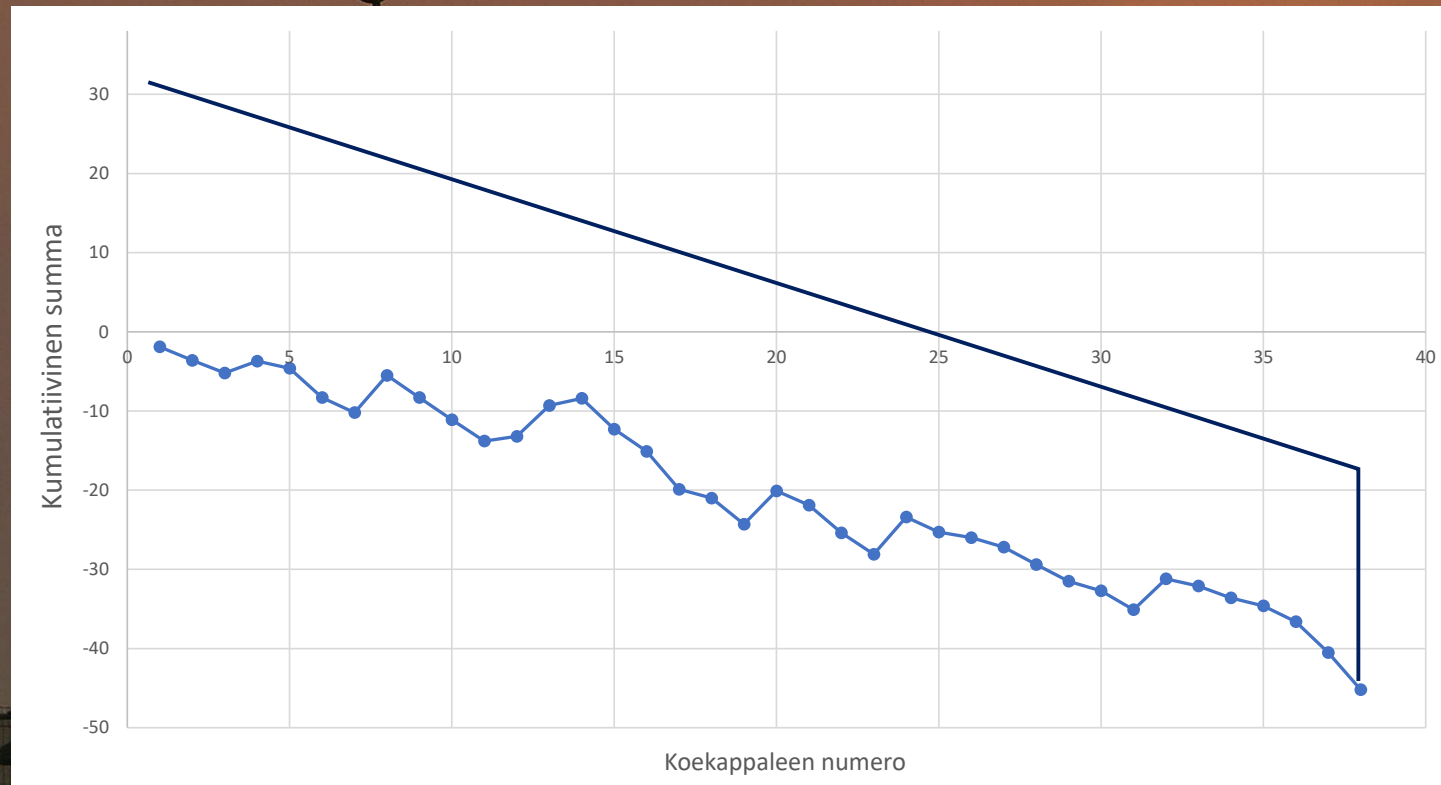
CUSUM:in käyttö muussa laadunvalvonnassa

CUSUM:ia käytetään betoniperheen vaatimuksenmukaisuuden osoittamiseen samalla tavalla kuin laadunohjaukseen. Erona on, että

- ainoastaan 35 viimeisintä tulosta tarkastellaan
- lujuuteen vaikuttavien toimenpiteiden jälkeen kumulatiivista summaa ei nollata
- ainoastaan ylempää hälytysrajaa, joko kertoo tavoitelujuuden alituksesta, käytetään
- hälytysrajan parametrit on valittu siten, että hälytys eli ilmoitus vaatimusten vastaisuudesta vaatii suuremman poikkeaman tavoitelujuudesta kuin hälytys laadun ohjauksessa
- laadunvalvonnassa käytetään ainoastaan määrittelynikäisistä koekappaleista mitattuja tuloksia.



CUSUM laadunvalvonta (edellisen esimerkin tulosten mukaan)



The background image shows a construction site at sunset. A large crane is in the center, lifting a heavy rectangular object. Two workers in hard hats are visible on the left, and another worker is on the right. The sky is a mix of orange and red, with a large, bright sun on the right side. The overall scene is silhouetted against the bright sky.

CUSUM R (tavoitehajonnan ohjauksen)

Perheen keskihajonnalle asetetaan oletusarvo, jonka oikeellisuutta seurataan CUSUM R -kaaviossa.

Mikäli kaaviossa hajontaa arvioivan kumulatiivisen summan käyrä risteää valvontarajan kanssa, hajonnan oletusarvoa suurennetaan tai pienennetään.

Hajonnan oletusarvo on aina vähintään $2,0 \text{ MN/m}^2$.

CUSUM C

Kun vaatimustenmukaisuus perustuu 28 vuorokauden lujuuksiin, suositellaan järjestelmää, jolla 28 vuorokauden lujuus arvioidaan varhaislujuustestauksen perusteella. Nämä arvioidut lujuudet korvataan laadunvalvonnassa todellisilla 28 vuorokauden lujuuksilla, kun ne ovat saatavilla.

Menetelmän, jolla varhaislujuus muutetaan 28 vuorokauden lujuudeksi, oikeellisuutta arvioidaan CUSUM C -kaaviossa. Mikäli kaaviossa varhaislujuuden avulla arvioidun ja mitattujen lujuuksien erotuksen kumulatiivisen summan käyrä risteää valvontarajan kanssa, muutetaan parametreja, joilla varhaislujuustulos muutetaan 28 vuorokauden lujuudeksi.

