

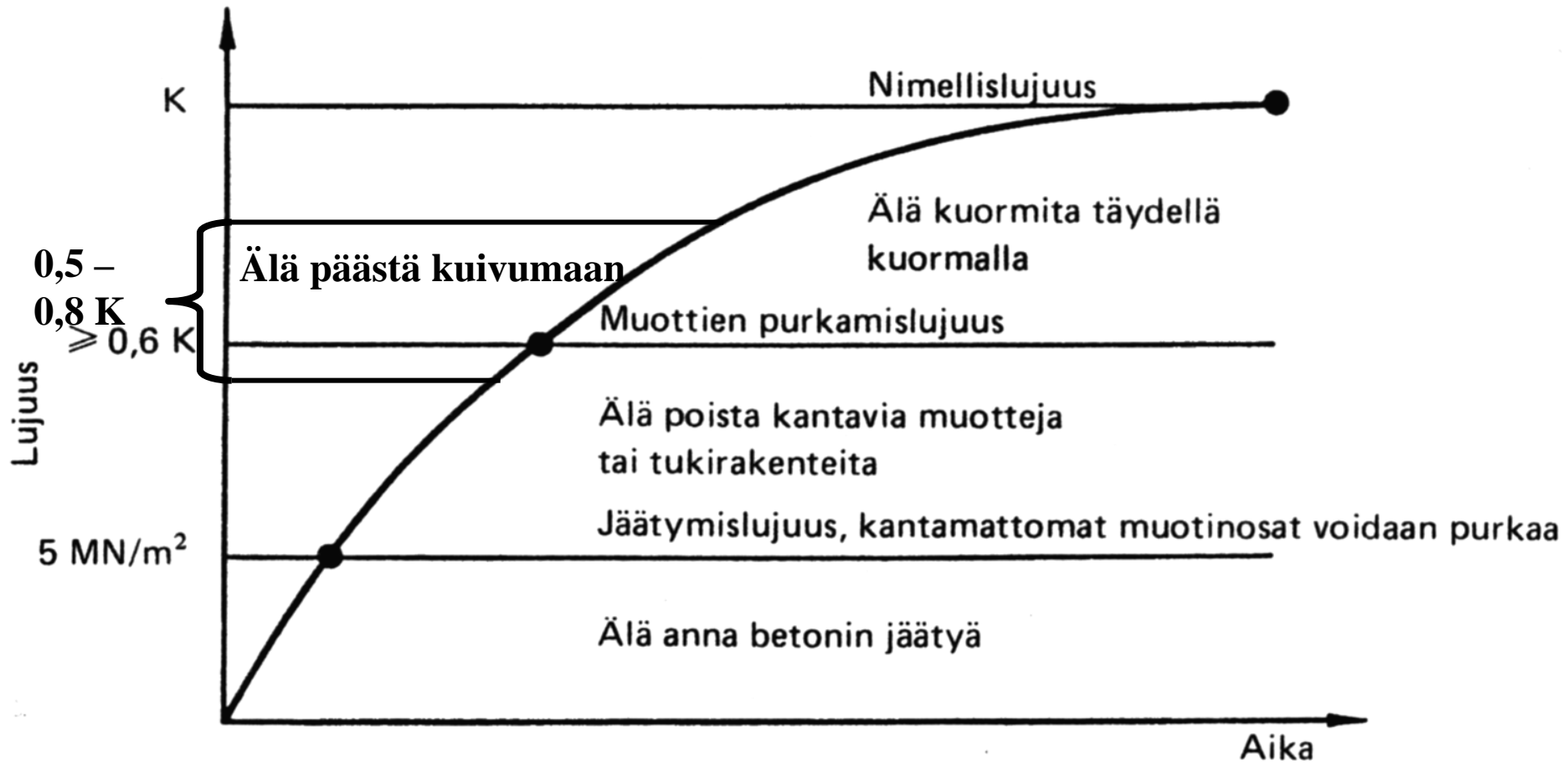
Betonin lujuuden kehittymisen seuranta

Betonilaborantti- ja myllärikurssi,
31.1.2024
Kim Johansson

Kim Johansson
Erityisasiantuntija , DI
Suomen Betoniyhdistys ry



Miksi lujuuden kehittymistä tulee seurata?



Betonin jäätyminen

Betoni ei saa jäätyä nuorena (lujuus < 5 MPa)

Oheinen tapaus Lahdesta 1963



Koko Suomea puhuttanut onnettomuus tapahtui Lahdessa Mustankallionmäellä pääsiäisenä 50 vuotta sitten. Oli pitkänperjantain ilta ja suurin osa asukkaista oli jo vetäytynyt yöpuulle. Yhtäkkiä hiljaisuuden rikkoi ääni, jota on kuvailtu äkilliseksi rysähdykseksi tai kuin sorakuorma kipattaisiin autosta tielle.

Pimeyteen tihrustelleen ihmiset kokivat elämänsä järkytyksen kun syy rysäykseen selvisi: Kokonainen, lähes valmiiksi rakennettu 9-kerroksinen kerrostalo oli luhistunut muutaman metrin korkuiseksi kasaksi betonipölyä ja harjalautoja.

Kuin ihmeen kaupalla kukaan ei loukkaantunut onnettomuudessa. Pyhäpäivän iltana töissä olivat ainoastaan rakennuksen lämmittäjät, jotka hekin olivat sattumalta viettämässä kahvitaukoaan sortumisen hetkellä.

Myöhemmin onnettomuuden syy selvisi.
Rakennusvaiheessa betoni oli päässyt jäätymään. Kun kevät lauhtui ja rakennusta alettiin lämmittää, jätynyt betoni sulii kohtalokkain seurauksin.

Talon sortuminen on suuri uutinen koko Suomessa ja ihmiset läheltä ja kaukaa tulivat päällistelemään roskaläjää, joka talosta jäi.

Huhuja ja puheita riitti. Syyllisen etsiminen sai surullisen lopun, kun rakennuksesta vastannut urakoitsija päätyi tekemään itsemurhan

Jälkihoitovaatimus nimellislujuudesta SFS 5975 ja BY 65 mukaan

Jälkihoitoaika määräytyy nimellislujuuden
perusteella

Rasitusluokissa X0 ja XC1:	50 %
Rasitusluokissa XF2 ja XF4:	80 %
Muissa rasitusluokissa:	70 %

Betonin lujuus varmistettava ennen jälkihoidon
lopettamista



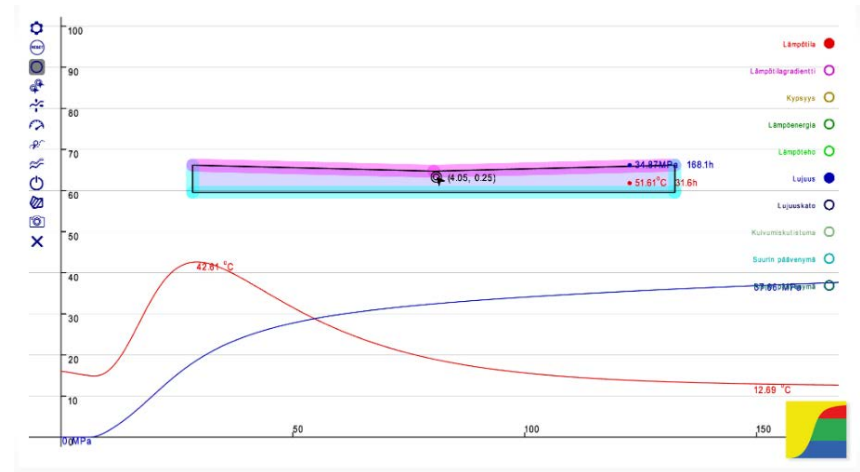
Miten lujuuden kehittymistä voi seurata?

- Mittaamalla sementin hydrataatiossa vapautuvan lämpöenergian määrää: Vapautunut energia kertoo hydratioreaktioiden etenemisestä betonissa.
- Sementin eri klinkkerimineraalit tuottavat eritavalla lämpöä ja lujuutta
- Mittaamalla betonin lämmönkehitystä ja sähkönjohtavuutta.
- Hydrataation edetessä betonin vapaa vesimäärä muuttuu ja sen seurauksena myös sähkönjohtavuus muuttuu
- Ensimmäinen tapa on yleisempi eikä vaadi erikoismittareita

Lujuuden arviointi käytännön olosuhteissa

Lujuuden etenemisen seuraaminen hydrataatiolämmön avulla käytännön olosuhteissa vaatii että

- ▶ Sementin klinkkerimineraalikoostumus tulee tietää tarkasti tai selvittää tai on tunnettava vastaavan betonikoostumuksen lujuudenkehitys + 20 asteessa tai
- ▶ Lämmönsiirtymistä ympäristön kanssa ei saa tapahtua tai se tulee tuntea tarkasti jos halutaan tehdä ennakkolaskelmia.
- ▶ Ennakkolaskenta BetoPlus ja Betologi ohjelmilla on mahdollista koska ohjelmaan syötetään sideaineen tiedot sekä rakenteen ja ympäristön tiedot.



Lämpötilan vaikutus lujuudenkehitykseen

- Peruskoulukemiasta on tuttua nyrkkisääntö:
 - Kun lämpötila nousee 10°C, reaktionopeus kaksinkertaistuu.
- Tarkemmin fysikaalisessa kemiassa reaktionopeuden ja lämpötilan yhteys on esitetty Arrheniuksen yhtälöllä:
 - $$k = A \cdot \exp(-E_a / R \cdot T)$$

Lämpötilan vaikutus lujuudenkehitykseen (jatkuu)

- Näiden kahden menetelmän välille on kehitetty yksinkertaisia, mutta samalla kyllin tarkkoja laskukaavoja:
 - (Nykäsen malli)
 - Eurokoodin laskentamalli
 - Sadgroven menetelmä
- Betonin- ja sementtiteollisuus on kehittänyt myös sideaineiden ominaisuuudet huomioivia ohjelmia. Ohjelmat ottavat huomioon myös sementin ja seosaineiden laadun. Ohjelmat ovat ainoastaan kehittäjiensä käytössä

Sadgroven menetelmä

Nykästä tarkempi menetelmä on ns. Sadgroven menetelmä, jossa betonin kypsyysikä t_{20} lasketaan kaavalla:

$$t_{20} = \Sigma \left((T + 16 \text{ °C}) / 36 \text{ °C} \right)^2 \times t$$

missä T on betonin lämpötila aikana t [°C]

t on kovettumisaika [d].

Sadgroven menetelmä

Oletetaan lieriökoekappale jota säilytetään + 20 °C 7 vrk. Sadgroven kaavalla laskien tämän betonin kypsyudeksi saadaan

$$t_{20} = \left(\frac{20 + 16}{36} \right)^2 \times 7 = 7 \text{ vrk}$$

Säilytys +10 asteessa:

$$t_{20} = \left(\frac{10 + 16}{36} \right)^2 \times 28 = 3,6 \text{ vrk}$$

Säilytys +30 asteessa:

$$t_{20} = \left(\frac{30 + 16}{36} \right)^2 \times 7 = 11,4 \text{ vrk}$$

Kun koekappale puristetaan saadaan tulokseksi 38 Mpa.

Sadgroven menetelmä

10 asteessa säilytetyn betonin kypsyys on 51 % 20 asteessa säilytetyn betonin kypsyudesta 7 vrk iässä

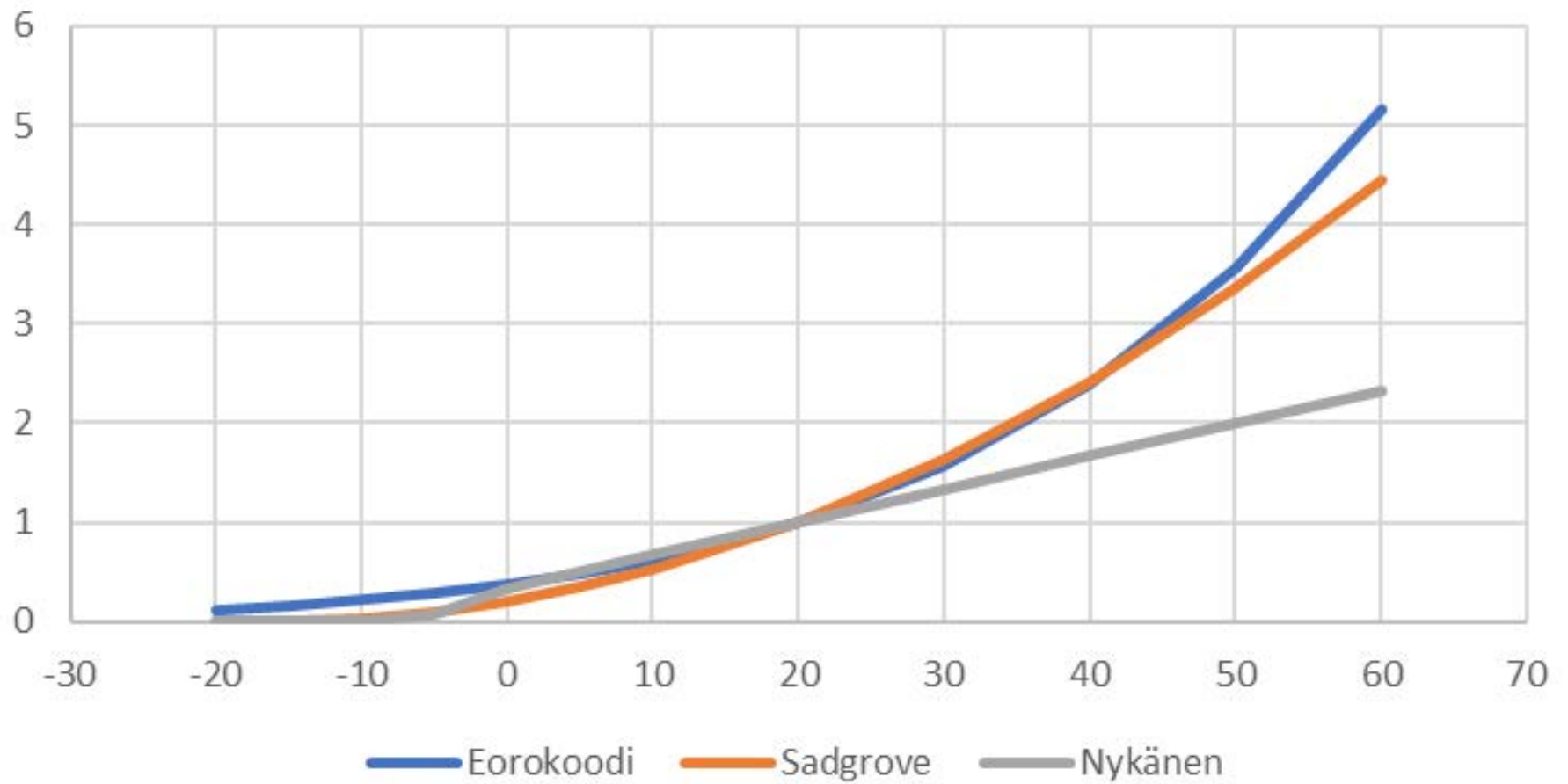
30 asteessa säilytetyn betonin kypsyys on 163 % 20 asteessa säilytetyn betonin kypsyudesta 7 vrk iässä

Jos olemme puristaneet 20 asteessa säilytetyn koekappaleen ja saaneet tulokseksi 24 Mpa on

10 asteessa säilytetyn koekappaleen lujuus luokkaa $0,51 \times 24 = 19$ Mpa ja

30 asteessa säilytetyn koekappaleen lujuus luokkaa $1,61 \times 24 = 39$ Mpa.

Lujuudenkehitysnopeus



Lujuuden arviointi käytännön olosuhteissa

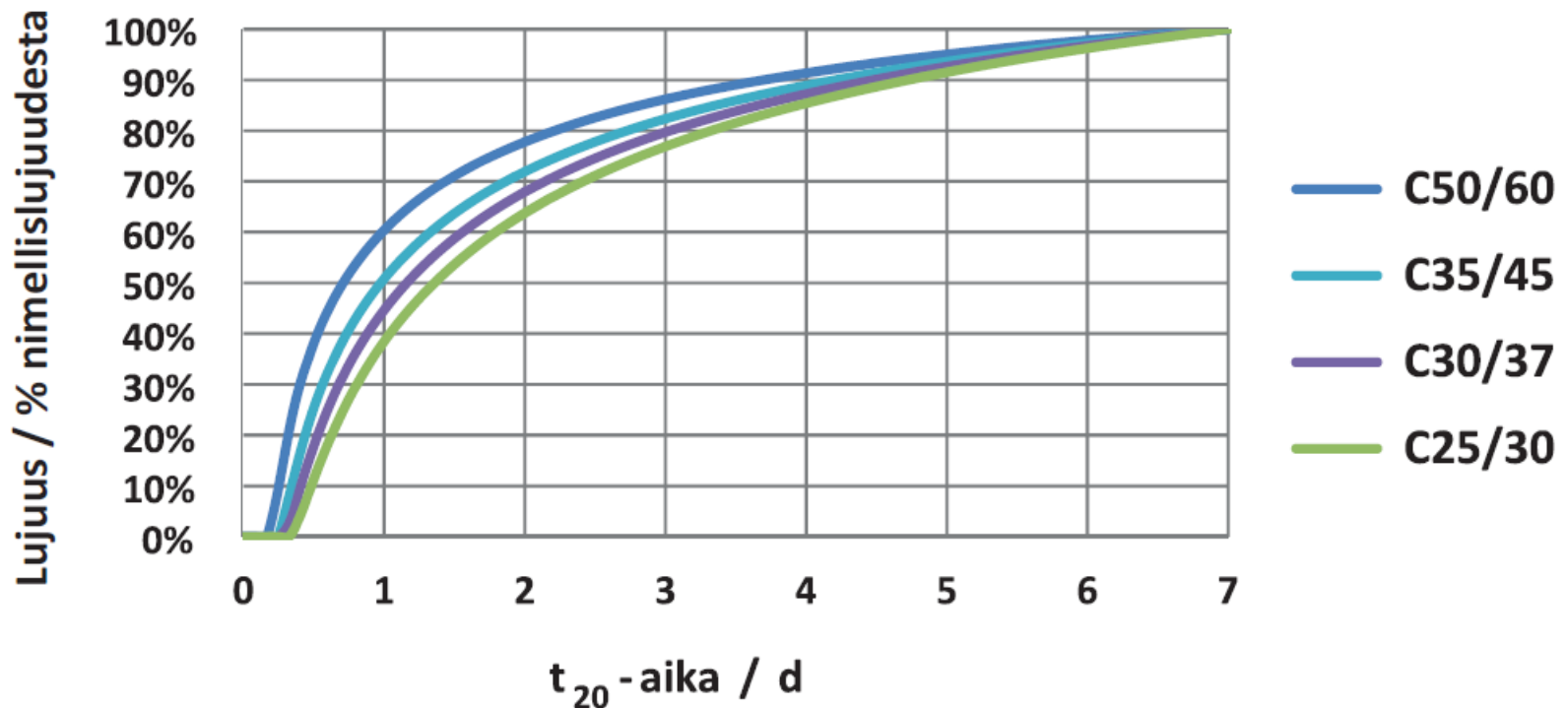
- Sadgroven menetelmässä mitataan betonin lämpötila eri aikoina valun jälkeen.
- Mittausaikojen välillä ei ole merkitystä, mutta mitä useammin lämpötila mitataan, sitä tarkempi on tulos. Automaattiset mittarit voi ohjata tallentamaan lämpötila esimerkiksi 1 tunnin välein.
- Lämpötilojen ja mittausaikojen välin avulla lasketaan ns. kypsyysikä
- Kypsyysikä saadaan kertomalla mittausajankohtien välisen betonin keskimääräinen lämpötila mittausajankohtien välisellä ajalla t_{20}
- Koko mitatun ajanjakson kypsyysiät lasketaan yhteen ja saadaan mitatun ajanjakson aikana betonin saavuttama kypsyysikä Σt_{20}

Lujuuden arviointi käytännön olosuhteissa

- Tämä Σt_{20} arvo kuvaa kyseisen betonin kypsyttää kyseisissä olosuhteissa kyseisellä betonilla
- Saatua kypsyttää verrataan vastaavan betonin +20 asteessa saavuttamaan kypsytyteen.
- Jotta vertailu voidaan tehdä on meidän tunnettava kyseisen betonin lujuudenkehitys +20 asteessa
- Betoninormin liitteessä 5 on esitetty valmiiksi laskettuja käyriä lujuudenkehityskäyriä eri sideaineilla ja lujuusluokilla
- Vertaamalla työmaalla mitattua kypsyttää vastaavan sideaineen ja lujuusluokan käyrään voidaan betonin saavuttama lujuus arvioida

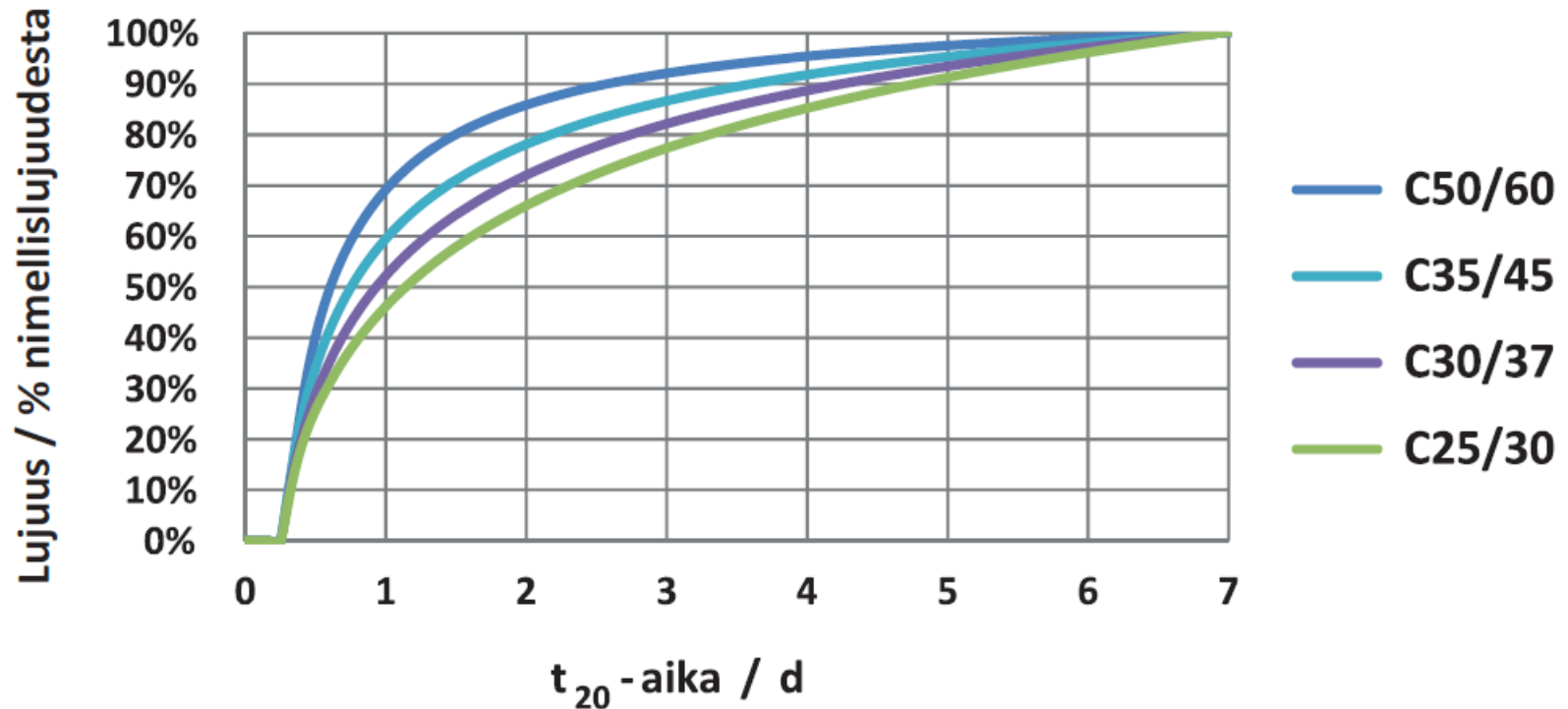
Kypsyys vs. lujuus (arvosteluikä 7 d)

Nopeasti kovettuva betoni
sideaine CEM II-A LL 42,5 R



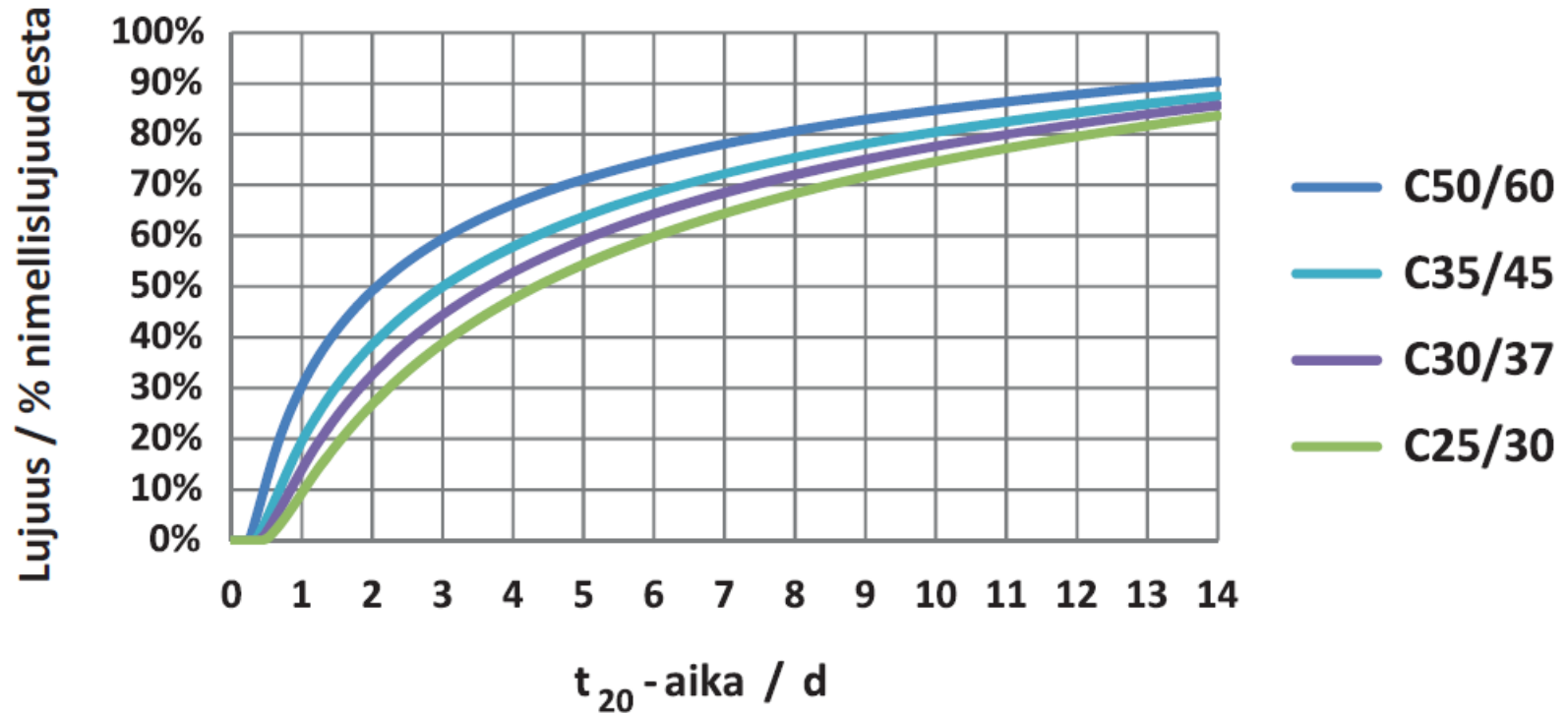
Kypsyys vs. lujuus (arvosteluikä 7 d)

Nopeasti kovettuva betoni sideaine CEM I 52,5 N



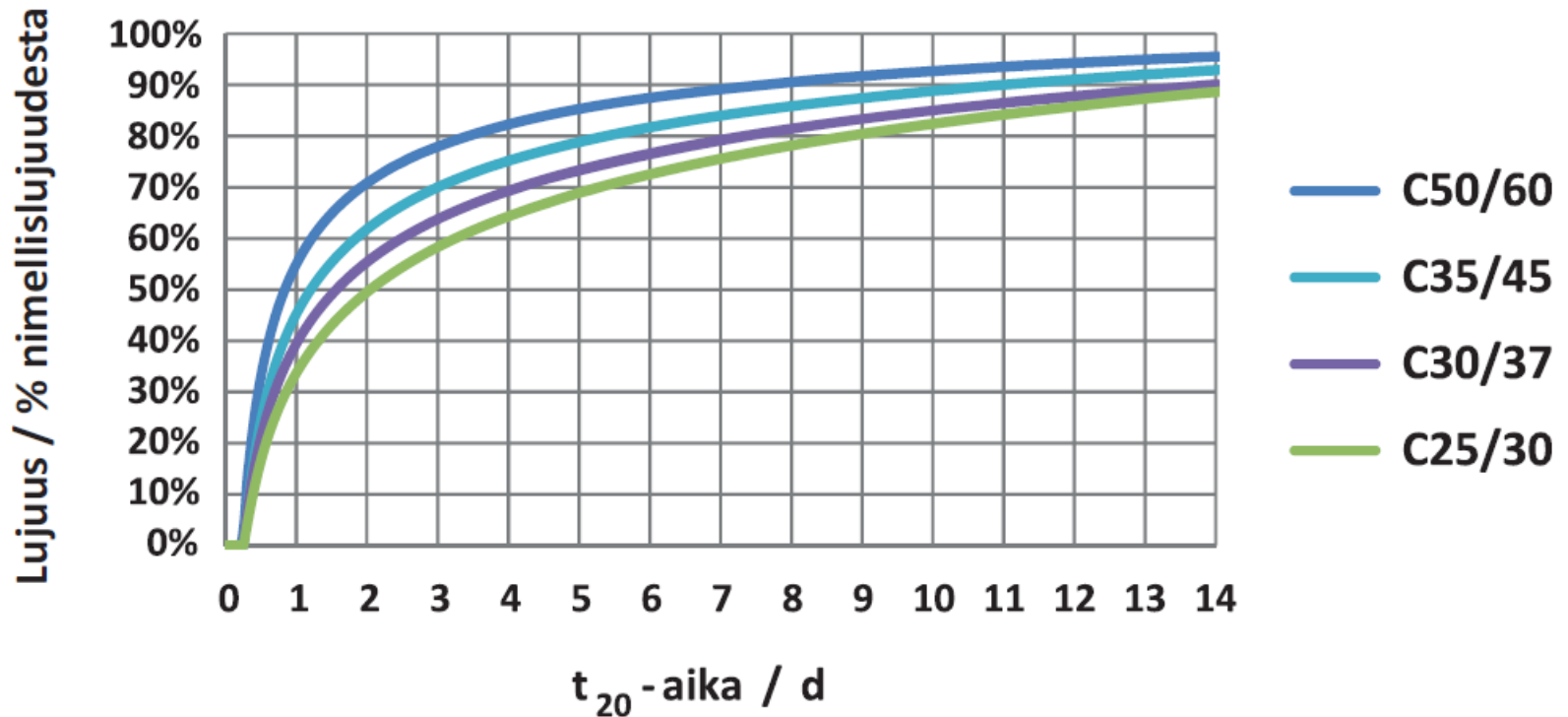
Kypsyys vs. lujuus (arvosteluikä 28 d)

Normaalisti kovettuva betoni
sideaine CEM II/B (S-LL) 42,5 N



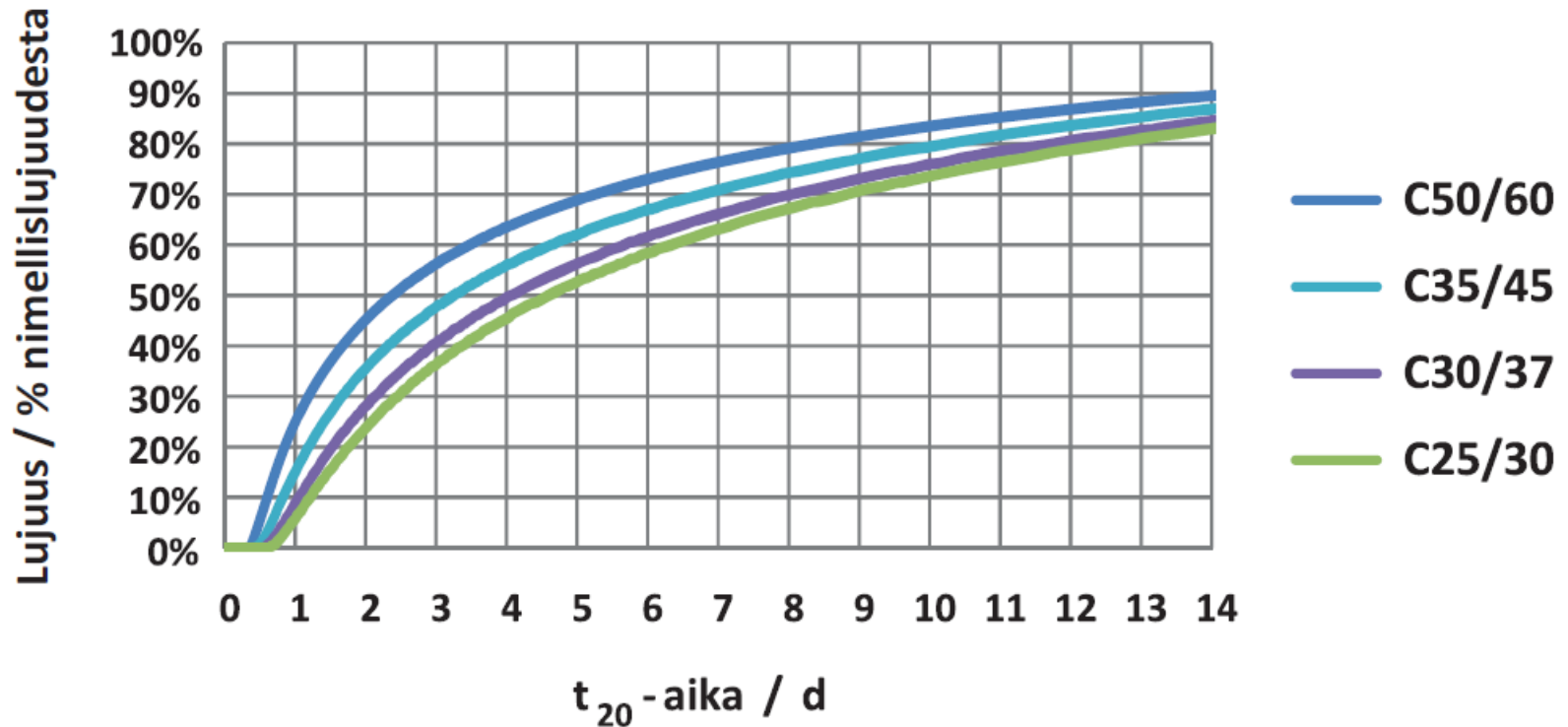
Kypsyys vs. lujuus (arvosteluikä 28 d)

Normaalisti kovettuva betoni sideaine CEM I 52,5 N



Kypsyys vs. lujuus (arvosteluikä 28 d)

**Normaalisti kovettuva betoni
sideaine CEM I 52,5 N (65 %) + lentotuhka (35 %)**



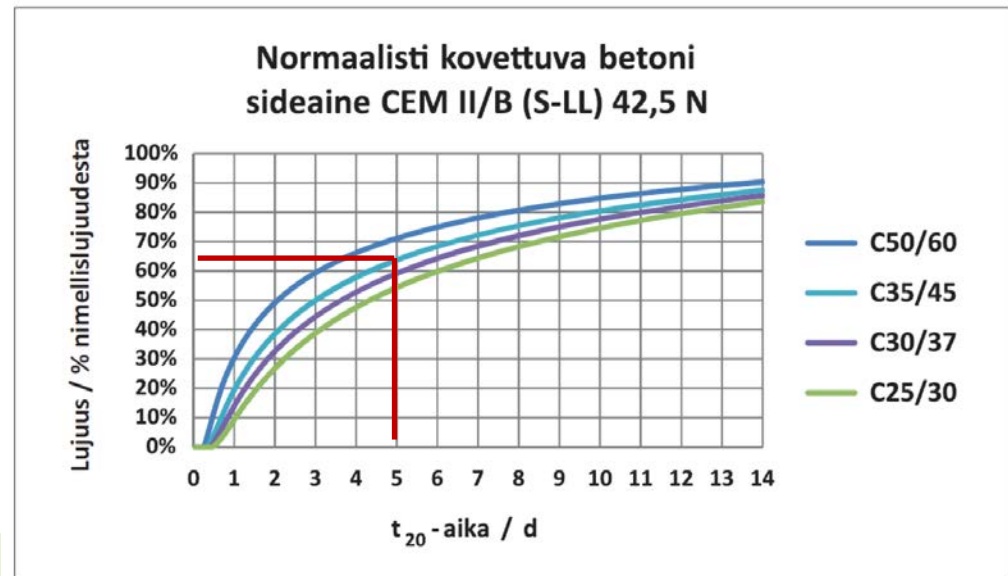
Esimerkki

Taulukko 3.14. Esimerkki kypsyiden kehittymisen arvioinnista Sadgroven menetelmää käyttäen.

aika h	betonin lämpötila T	Δt h	Δt d	keskimää- räinen läm- pötila T	kypsyyslisä t_{20} d	kypsyys Σt_{20} d
0	22					
6	28	6	0,25	25	0,32	0,3
12	26	6	0,25	27	0,36	0,7
24	24	12	0,5	25	0,65	1,3
48	20	24	1	22	1,11	2,4
72	18	24	1	19	0,95	3,4
96	16	24	1	17	0,84	4,2
120	14	24	1	15	0,74	5,0

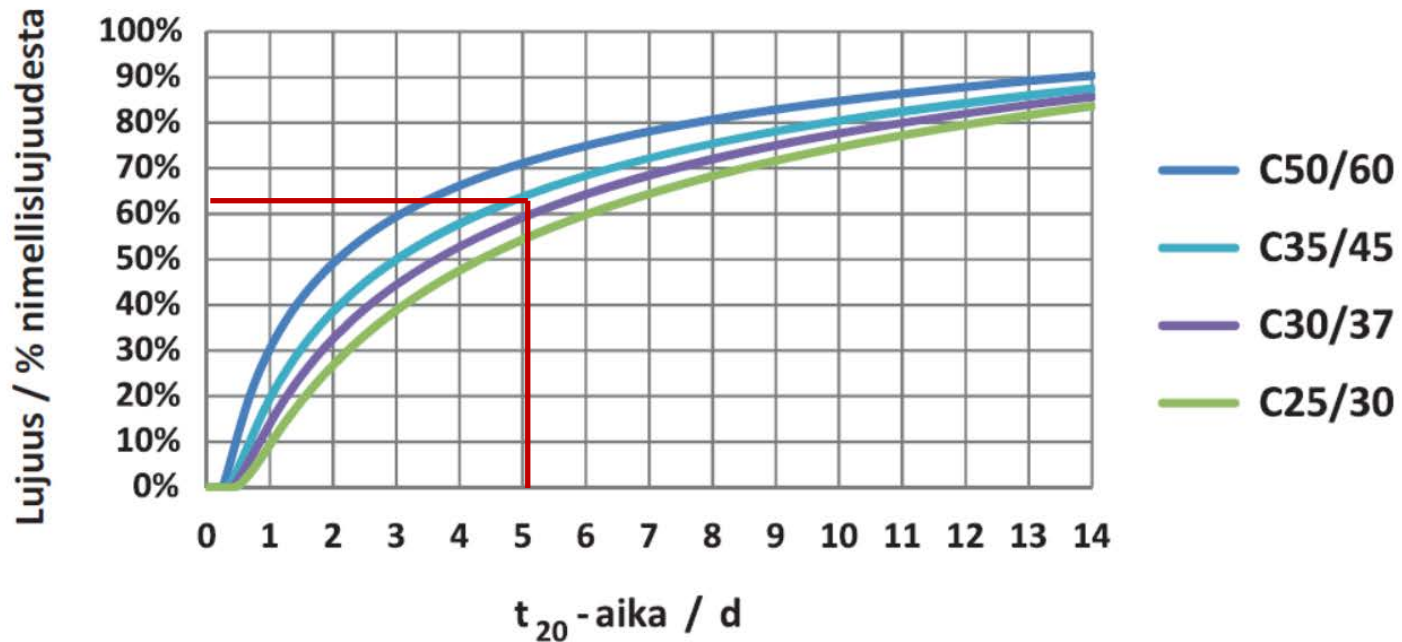
Lujuudenkehityksen arviointi

- Edellisen kalvon laskelman pohjalta voidaan arvioida esimerkiksi seuraavaa:
 - Betonin lujuus on C35/45
 - Normaalisti kovettuva betoni ja sideaine on CEM II A-LL 42,5 R
 - Betonin kypsyysikä 5 vrk => 65 % nimellislujudesta
 - $35 \times 0,65 = 23 \text{ MPa}$



Lujuudenkehityksen arviointi

Normaalisti kovettuva betoni
sideaine CEM II/B (S-LL) 42,5 N



Lujuudenkehityksen arviointi

- Edellisen kalvon laskelman pohjalta voidaan arvioida esimerkiksi seuraavaa:
 - Betonin lujuus on C35/45
 - Normaalisti kovettuva betoni ja sideaine on CEM I 52,5 N
 - Betonin kypsyysikä 5 vrk => 85 %
nimellislujudesta
 - $35 \times 0,85 = 30 \text{ MPa}$

