



Betooni sideained tulevikus

Portlandsemendil on pikk ajalugu, kuid praegu oleme selgelt pöördepunktis. Tulevikus on portlandtsemendi kõrval üha enam võimalusi. Kuid tõenäoliselt ei kao portlandtsement kasutuselt ka tulevikus. Selles artiklis hinnatakse, milliseid muutuseid toimub betooni sideainetes tulevikus, samuti seda, millal need muutused võiksid tõenäoliselt aset leida.

JOUNI PUNKKI

Professor (POP), betoonitehnika, Aalto ülikool, ehitustehnika õppetool, jouni.punkki@aalto.fi



Jouni Punkki

Soome juhtiv tsemendi- ja betooniteadlane professor **Jouni Punkki** on avaldanud ülevaatliku artikli, millest võiks ka Eesti asjahuvilistele kasu tõusta. Täname autorit ja Soome Betooniühingut artikli avaldamise võimaluse eest eesti keeles.

Toomas Vainola, Eesti Betooniühingu tegevjuht

Tõlgitud soome keelest, tõlge: Epp Ehasalu. Ilmunud originaalis ajakirjas *Betoni*, nr 4, 2021.

Tsemenditootmise ajaloost

Nüüdisaegse tsemendi areng algas 18. sajandi lõpus. 1824. aastal sai inglane **Joseph Aspdin** patendi tsemendile, mida ta nimetas portlandtsemendiks. Tsemendi värvus ja kõvadus meenutas Inglismaal Portlandi krahvkonnas tavaliselt kasutatud ehituskivi ja seetõttu hakati tsemendi nimetama portlandtsemendiks. Hiljem, 1844. aastal tootis inglane **Isaac Johnson** tsemendi, mille omadused olid samad kui tänapäeval portlandtsemendil. Oluline Johnsoni tsemendis oli klinkri põletamine

kuni paagutamiseni. Varem sooviti kõvade klinkrite moodustumist vältida, sest klinkri jahvatamine oli keeruline ja kulukas. Johnsoni väljatöötatud tsemendi omadused olid varasematest tsementidest selgelt paremad ja tsemendi tootmine kasvas kiiresti. Tsemente valmistati šahtahjudes. Kaltsineerimiseks vajaliku kõrge temperatuuri saavutamine šahtahjus ei olnud kulutõhus, lisaks jäi osa toorainest alapõletatuks. Lõpuks lahendas päris 19. sajandi lõpus välja töötatud pöördahi paljud klinkri põletamisega seotud probleemid ja betoon muutus kiiresti ehitamise põhimaterjaliks.

Kuigi portlandtsemendi tootmine on püsinud põhimõtteliselt väga sarnasena juba üle saja aasta, on tsemendi tootmises ja selle kaudu ka omadustes toimunud olulisi muutusi. Näiteks betooni survetugevus oli 19. sajandi keskel vaid umbes 5 MPa ja 20. sajandi alguseski ainult umbes 20 MPa¹. Tsementide muutuste olulisemateks põhjusteks on põlemistehnoloogia ja tsemendijahvatuse areng.

Ka räbutsemente töötati välja juba 19. sajandi lõpul, näiteks

Toode/tooterühm	n	Keskmine väärtus kg-CO ₂ /kg	Min. väärtus kg-CO ₂ /kg	Maks. väärtus kg-CO ₂ /kg
Kõik tooted	202	1,48	0,004	19
CO ₂ andmeklass: betoonitooted	57	0,24	0,006	3,8
CO ₂ andmed, betoonist valmisdetailid	28	0,16	0,14	0,20
CO ₂ andmed, valmisbetoonid	10	0,10	0,06	0,16
CO ₂ andmeklass: puutooted	13	0,40	0,07	1,0
CO ₂ andmeklass: teras- ja metallitooted	17	3,7	0,50	12

NB! Toodete eriemissioon ei ole otseselt võrreldav. Võrdlusi tuleks teha hoone tasandil ja kogu olelusringi arvesse võttes. Tabeli eesmärk on näidata, et betooni eriemissioon ei ole suurem kui teistel ehitusmaterjalidel.

Tabel 1. CO₂data.fi teenuses olevate (9.11.2021) ehitusmaterjalide CO₂-eriemissioon (GWP, A1.A3, ilma 1,2-koefitsiendita)⁴. Võrdluseks on esitatud eri klasside (betoonitooted, puutooted ning teras- ja metallitooted) heitmed ning betooni osas ka betoonist valmisdetailide ning valmisbetoonide heitmed.

töötas 1892. aastal sakslane **Passow** välja räbutsementi, mis sisaldas 35% portlandtsementi ja 65% kõrgahjuräbu. Eriti Saksamaal ja Hollandis on räbubetoone juba ammu kasutatud. Hollandis on räbubetoone kasutatud infrastruktuuris juba alates 1920ndatest. Suurim räbukogus on olnud 85% sideaine kogusest, tüüpiline osakaal on olnud umbes 70%. Madalmaades kasutatakse igal aastal ligikaudu 10 miljonit kuupmeetrit räbubetooni².

Hetkeseis ja vajadused muutusteks

Sideainete muutmise vajadus tuleneb konkreetset portlandklinkri valmistamisel tekkivast CO₂ saastest. Portlandklinkri tootmine tekitab umbes 800 kg CO₂ saastet iga tonni toote kohta. Tsementide heitkogused on väiksemad, kuna tsement sisaldab alati ka muud, mitte ainult klinkrit.

Tsemenditööstus on hõlmatud ELi heitkogustega kauplemise süsteemiga ja seega on tsemenditööstus reageerinud heitmetele juba varem kui näiteks betoonitootjad või betooni kasutajad. Tsemenditootjad on valmistanud lisanditega portlandtsemente ja seega on klinkrikogust tsemendis vähendatud. Lisaks lisandite kasutamisele on suudetud heitmeid vähendada põlemisprotsessi energiatõhususe parandamisega ja kasutades üha enam jäätmekestuseid. Näiteks Finnsementi Oy

tsementide keskmine eriheide 2020. aastal oli 595 kg CO₂ tn³. Tervikuna on Soomes aga lisanditega portlandtsementidesse suhtunud suhteliselt mõõdukalt, näiteks esimesed CEM III tüüpi tsemendid jõudsid turule alles 2021. aastal.

Tsemendi ja seda kaudu ka betooni eriheitmed ei ole eriti suured. Tabelis 1 on toodud ehitusmaterjalide eriheitmed. Andmed on kogutud Soome Keskkonnakeskuse emissioonide andmebaasist CO₂Dataff⁴, mis sisaldab kokku 202 ehitusmaterjali või toodet. Kõikide andmebaasis olevate ehitusmaterjalide keskmine emissioon on 1,48 kg CO₂/kg. Tabelist on selgelt näha,

Granuleeritud kõrgahjuräbu (GBFS) on terasetööstuse jääkprodukt, mida saab betooni tugevuse ja vastupidavuse suurendamiseks tsemendis taaskasutada.

et betooni olulise rolli põhjus CO₂ heitkoguste puhul ei ole kõrge eriemissioon. Betoonist tulenev märkimisväärne CO₂ emissioon on tingitud tohututest kasutatud betoonikogustest.

Viimase paari aasta jooksul on oluliselt kasvanud vajadus vähendada betooni ja tsemendi CO₂ heitkoguseid. Taustaks on Soome süsinikuneutraalsuse eesmärk aastal 2035. Praktikas tekitavad surve CO₂ emissiooni vähendamiseks kavandatavad hoonespetsiifilised emissiooniaruutused, eelkõige keskkonnaministeriumi koostatav määrus hoone olelusringi süsinikujalajälje hindamise kohta.

Kavakohaselt arvestatakse ussheitiste CO₂ emissiooni juba 2025. aastal ning igale hoonetüübile kehtestatakse emissioonipiirmäär.

Üldiselt peetakse CO₂ heitkoguste vähendamist betoonitööstuses äärmiselt oluliseks ning paljudel betooniettevõtetel on konkreetsed ettevõttepõhised vabatahtlikud eesmärgid betooniheitmete vähendamiseks. Heitkoguste vähendamine on oluline ka majanduslikult. Soome betoonitootmise CO₂ heitkogused kokku on ligikaudu 1,2 miljonit tonni aastas, millest tsementide (kodumaine toodang + importtsement) osakaal umbes 1,0 miljonit tonni. Kui tsemendi emissioone õnnestuks



FOTO: SSAB / BETONI, NR 4

vähendada poole võrra ja saastekvootide hinnaks oletada 50 eurot tonni kohta, oleks kulumõju tööstusele 25 miljonit eurot aastas. Saastekvootide hind võib tulevikus olla selgelt kõrgem. 2022. aastal võetakse kasutusele ka betooni süsinikvähesusliigitus BY-Low Carbon Classification. See omakorda suurendab nõudlust madalama emissiooniga betooniklasside järele.

Nagu näitab tabel 1, on betooni eriheitmed üsna mõistlikud ja betooni märkimisväärsed CO₂ heitkogused tulenevad just suurest betoonikasutusest. Endiselt on aga kõige tõhusam viis betooni heitmete vähendamiseks sideaine heitkoguste vähendamine. Teised lahendused võiksid olla betooni kasutamise vähendamine, näiteks efektiivsemate konstruktsioonide abil, samuti tsemendi/sideaine koguse vähendamine betoonis. Mõlema ülalnimetatud vahendiga on võimalik saavutada heitkoguste vähenemine, kuid kokkuvõttes jääb kokkuhoid suhteliselt tagasihoidlikuks. Betooni asendamine muude materjalidega ei anna samuti märkimisväärset heitkoguste vähenemist. Märkimisväärset heitkoguste vähendamist on võimalik saavutada ainult siis, kui:

1. sideaine eriheitmeid saab oluliselt vähendada ja
2. madala emissiooniga sideaineid kasutatakse laialdaselt.

Loomulikult tuleb kasutada kõiki vahendeid heitkoguste vähendamiseks.

Tuleviku sideained

Juba lähitulevikus on vaja praegusest oluliselt väiksema CO₂ emissiooniga sideaineid. Lõppeesmärgiks on saavutada betooni sideainete peaaegu nullheide. Heitkoguste vähendamise meetmed võib jagada kolme põhirühma:

1. lisanditega portlandtsemendite praegusest laialdasem kasutamine;
2. alternatiivsete sideainete kasutamine;
3. portlandtsemendi tootmise muutmine madalaemissiooniliseks. Ülalnimetatud alternatiivid ei



FOTO: TEEMU OJALA / BETONI, NR 4



FOTO: BETONI, NR 4

ÜLEMISEL FOTOL:
Betooni mineraalsed toorained: tsement, täiteaine, killustik ja jäme kivimaterjal.

ALUMISEL FOTOL:
Mikropilt granuleeritud kõrgahjuräbust.

välista üksteist, see tähendab, et edaspidi võidakse kasutada kõiki esitatud alternatiive samal ajal. Lisaks tuleb betooni CO₂ emissiooni vähendamiseks kasutada kõiki võimalikke vahendeid, näiteks konstruktsiooni tõhususe arendamine ja sideaine koguse vähendamine betoonis.

Lisanditega portlandtsemendite praegusest laialdasem kasutamine

Lisanditega portlandtsemendid, eriti räbustsemendid, on tuntud tooted, nende võimalused ja ka piirangud on hästi teada. Euroopa tsemendistandard (SFS-EN 197-1) lubab lisandite laialdast kasu-

tamist tsemendis. Muu hulgas on lubatud tsement, mis sisaldab 95% kõrgahjuräbu ja 5% tsemendiklinkrit (CEM III/C). Soomes saab aga sellist tsementi kasutada vaid sisekonstruktsioonides. Üsna suurtes kogustes võib tsementidele lisada ka muid lisandeid, nagu lendtuhk, ränioksiid, putsolaan, kuid mitte samas mahus kui kõrgahjuräbu.

Seetõttu peetakse lisanditega portlandtsemendi kasutamise suurendamist kõige tõhusamaks lühikese ajaga saavutatavaks viisiks betooni heitmete vähendamisel. Lisanditega portlandtsemendi kasutamisel võib betooni heitkoguseid vähendada poole võrra või isegi rohkem. Lisanditega portlandtsemendite madalaim eriheide võib olla 100–200 kg CO₂/tn (CEM III/C). Võrdluseks võib tuua Finnsementi tsemendi Paraisten Oiva emissiooniväärtuse: 626 kg CO₂/tn.

Oiva tsement on samuti keskmisest madalama emissiooniga tsement.

Lisanditega portlandtsemendite kasutamisega seoses esineb ka probleeme, räbubetooni tugevuse kujunemine on paratamatult aeglasem kui CEM I või CEM II tüüpi tsementidel. See tähendab vormide hilisemat demonteerimist või alternatiivina kuumtöötuse või kiiren-

dite kasutamist. Kuumtöötlemise ja eriti kiirendamise jaoks on vaja teadus- ja arendustegevust.

Lisaks tugevuse arendamisele võivad rübubetooni vastupidavusomadused erineda tavapärase betooni omadest. Hollandlased on rübubetooni säilivusomadused, kui kõrgahjuräbu moodustab umbes 70% sideainest², kokku võtnud järgmiselt:

- ✗ kloriidide tungimine rübubetooni on aeglasem;
- ✗ tugevuse aeglasema saavutamise tõttu vajab rübubetoon pikemat järelhooldust;
- ✗ rübubetooni karboniseerumine on kiirem;
- ✗ rübubetooni külma- ja soolakindlus on halvem, kuigi Hollandi ilmastikuoludes ei omistata sellele olulist mõju;
- ✗ halb järelhooldus võib põhjustada halva külma- ja soolakindluse juba lühikese ajaga;
- ✗ täiteaine leelisreaktsiooni ei toimu, kui rübuisaldus on üle 50%.

Seppo Matala uuris oma väitekirjas karboniseerumise mõjusid rübubetooni poorsele struktuurile³. Ta leidis, et karboniseerimine muudab rübubetooni poorsust palju rohkem võrreldes tavabetooniga. Ka betooni vananemismõju oli tugevam rübubetooniga. Vananemisel on oluline mõju rübubetoonide külma- ja soolakindlusele.

Soome tingimustes ei ole mõistlik kasutada rüburiikkaid sideaineid külma- ja soolakooormuse all olevates konstruktsioonides. Just sel põhjusel piirab transpordiamet kõrgahjuräbu maksimaalseks koguseks P-klassi betoonis 50%. Erandiks on PO-betoonid.

Küsimärke on ka kõrgahjuräbu saadavuse osas. Kõrgahjuräbu tekib seoses terase valmistamisega, kuid tekkiva räbu kogus on kaugel tsemendis kasutatavatest kogustest. Seega võib tulevikus lisanditega portlandtsemendi kasutamise suurenedes kõrgahjuräbust puudus tulla. Lisaks mõjutab terasetööstuse üleminek vesiniku redutseerimisele oluliselt kõrgahjuräbu



FOTO: JOONI PUNKKI / BETONI, NR 4

Betooni asendamise muude materjalidega on keeruline paljudes kasutuskohades, näiteks infrastruktuuri ehitamisel.

Pildil Raftsundi sild Norras. Silla kogupikkus on 711 meetrit, selle pikim sildeulatus on 298 meetrit ja silla all olev suurim vaba kõrgus merepinnast on 45 meetrit.

kogust ja kvaliteeti. Väljakutseid on ka teiste lisandite saadavusega, näiteks hakkab lendtuhk Soome lähialadelt üsna pea otsa saama. Lubjakivi- ja savipõhiste materjalide, näiteks metakaoliini saadavusega ei ole selliseid probleeme nagu kõrgahjuräbu ja lendtuha puhul.

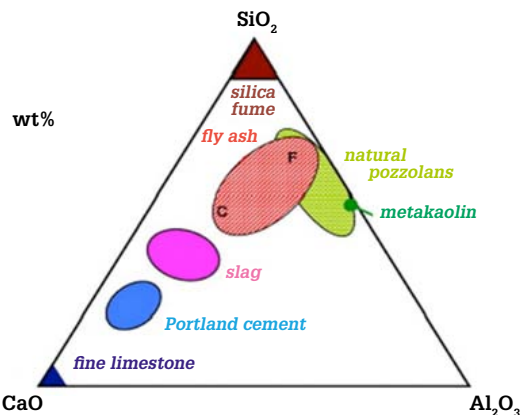
Täiendavaks väljakutseks kõrgahjuräbu puhul on eriheiteväärtuse võimalik suurenemine. Praegu arvestatakse kõrgahjuräbu heitkoguste hulka ainult jahvatamisest ja transpordist tekkivad heitkogused, kuid mitte terasetootmise heitkogused. Keskkonnamõju hindamise põhimõte on praegu selline, et osa põhitoodete valmistamisel tekkivatest heitkogustest suunatakse ka po-

tentsiaalsetele kõrvaltoodetele. Kõrgahjuräbu osas arutatakse seda praegu ELi tasandil ja tõenäoliselt tõuseb kuigivõrd kõrgahjuräbu CO₂ emissiooniväärtus. See kahandaks mingil määral kõrgahjuräbu kui emissioonivähendaja efektiivsust, kuid kõrgahjuräbu emissioonitase oleks edaspidigi selgelt madalam kui portlandtsemendil.

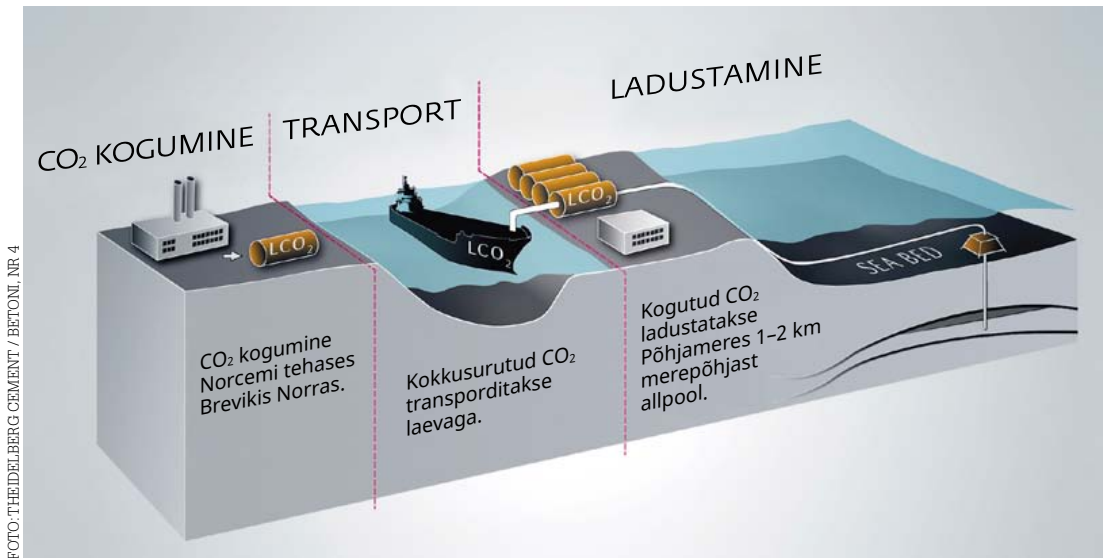
Alternatiivsed sideained

Alternatiivsete sideainete all mõeldakse sideaineid, mis ei sisalda portlandtsementi. Tuntumad alternatiivsed sideained on leelisaktiveeritud rübud ning geopolümeerid. Geopolümeeri kasutatakse sageli üldmõistena, kuigi rangelt võttes viitab see **Joseph Davidovitsi** välja töötatud aktiveeritud metakaoliinil põhinevale sideainele.

Lisaks leelisaktiveeritud rübudele on erinevaid alternatiivseid sideaineid. Portlandtsemendi peamine tooraine on lubjakivi (CaCO₃) ja lubjakivi kaltsineerimine (CaCO₃ -> CaO + CO₂) põhjustab suurema osa portlandtsemendi CO₂ heitkogustest. Alternatiivsed sideained peaksid eelistatavalt põhineda räni- või alumiiniumipõhisel toorainel (joonis 1). Nii saaks vähendada CO₂ emissiooni võrreldes portlandtsemendiga. Alternatiivsete sideainete tooraine on sageli teiste tööstusharude kõrvalsaadus või jäätmed.



Joonis 1. Portlandtsemendi ja lisandite koostis CaO-SiO₂-Al₂O₃ graafikul⁴



Joonis 2. Süsinikdioksiidi kogumise ja ladustamise põhimõte Norcemi tehases Brevikis Norras⁵.

Tuntud alternatiivsed sideained on järgmised:

- ✘ kaltsiumaluminaattsemendid, nt Ciment Fondu;
- ✘ kaltsiumsilikaattsemendid, nt Solidia cement;
- ✘ kaltsiumhüdrosilikaattsemendid, nt Celitement;
- ✘ kaltsiumsulfoaluminaattsemendid, nt LaFarge Aether ja ALI CEM;
- ✘ leelisaktiveeritud sideained, nt Cemfree;
- ✘ geopolümeerid, nt BanahCEM ja E-crete.

Ka Soome firma Betolar Oy töötab välja madala süsinikusisaldusega lahendusi betoonitööstuse jaoks. Betolar Oy eesmärk on võtta kasutusele alternatiivsed sideained.

Mõned eelnimetatud alternatiivsed sideained vähendavad sideaine CO₂ emissiooni, kuid osa neist on suunatud eelkõige tsemendi ja betooni omaduste muutmisele ning emissioon võib olla portlandtsemendi tasemel. Näiteks kaltsiumaluminaattsemendid parandavad oluliselt betooni tulepüsivust, kuid ei ole madala emissiooniga sideained.

Alternatiivsed sideained ei ole nullheitega. Näiteks leelisaktiveeritud räbu puhul tekitavad emissiooni räbu ja aktivaator. Ka jäätmeteks

liigituvad materjalid nõuavad teatud töötlemist, mis põhjustab heitmeid. Parimal juhul saavutavad alternatiivsed sideained sama CO₂-heitmetaseme kui rohke lisandiga tsemendid (nt CEM III/C).

Alternatiivsed sideained ei ole mingi uus leiutus. Leelisaktiveeritud räbu on patenditud juba 1895. aastal. Ulatuslikumalt arendati leelisaktiveeritud sideaineid Ukrainas 1960ndatel ja seal on neid edukalt kasutatud hüdrotehniliste ehitiste ja korrusmajade ehitamisel. 1980ndatel töötas soomlane **Bengt Forss** välja F-tsemendi, mis oli Ukraina sideainevariant. F-tsementi uuriti Soomes põhjalikult, kuid tegelikku kasutusse see kunagi ei jõudnudki. Samal ajal arendas Parteki tsemenditööstus leelisaktiveeritud räbu baasil sideainet, kuid sideaine sisaldas ka veidi portlandklinkrit. Seega ei olnud see rangelt võttes alternatiivne sideaine, vaid normikohane tsement. Parteki sideainet kasutati muu hulgas erinevate betoonitoodete valmistamisel. Kasutamine lõppes 1990ndate majanduslanguse tõttu.

Ka alternatiivsete sideainete puhul on väljakutseks tooraine piisav kättesaadavus. Alternatiivsete sideainete lisavõimaluseks on aga erinevate tööstuslike kõrvalsaaduste ja ka jäätmete ringlusse-

võtt. Kõrgahjuräbu ja lendtuhka saab hõlpsasti kasutada tavalises betoonitööstuses, kuid tööstuses tekib ka palju muid räbu-, tuha- ja jäätmete liike.

Neid materjale saab ära kasutada alternatiivsete sideainete valmistamisel, muidu jääksid sellised materjalid kasutamata. Seega peetakse alternatiivsete sideainete uurimist esmatähtsaks.

Teine, võib-olla isegi olulisem väljakutse alternatiivsete sideainete kasutamisel on piirangud kandekonstruktsioonides. Euroopa standardid reguleerivad üsna täpselt, mida tsement võib sisaldada (SFS-EN 197-1), ja teisalt, milliseid toormaterjale tohib betoonis kasutada (SFS-EN 206). Ala võib selles osas pidada konservatiivseks, kuid teisalt on ohutus ehituses kõige tähtsam kriteerium. Ei soovita võtta vähimatki riski uute, osaliselt tundmatute sideainetega. Ka majanduslikud riskid võivad olla suured, näiteks olukorras, kui kandekonstruktsioonid kaotavad oma tugevuse 20 aasta vanuses. On võimalik saada luba alternatiivsetele sideainetele ka siis, kui need ei vasta tsemendi- ja betoonistandardite nõuetele, kuid see tähendab tihti rasket protsessi. Üks võimalus on ETA heakskiit (European Technical Approval). Kesk-Euroopas

valmistatakse teatud määral erinevaid betoontooteid alternatiivseid sideaineid kasutades.

Just standardite piirangute, aga ka toorainete piiratuse tõttu on alternatiivsete sideainete kõige potentsiaalsemateks kasutuskohtadeks mittekandvad konstruktsioonid, näiteks erinevad betoontooted. Selliste toodete puhul on sideaine kvaliteedinõuded üldiselt leebemad kui kandekonstruktsioonidel. Alternatiivsete sideainetega võib seega saavutada heitkoguste olulise vähenemise konkreetsete toodete osas. Siiski jääb mõju üldistele heitkogustele betoonehituses tõenäoliselt väheseks.

Portlandtsemendi madala emissiooniga tootmine

Tehniliselt on võimalik toota portlandtsementi väga madala emissiooniga. See nõuab olulisi muudatusi tsemendi tootmisprotsessis:

- ✘ tsemendi tootmisel tekkiva CO₂ talletamine;
- ✘ fossiilkütusest loobumine põletusprotsessis.

Tekkiva süsinikdioksiidi talletamine mängib olulist rolli, sest umbes 60% tsemendi CO₂ emissioonist tekib just kaltsineerimisel, CaCO₃ laguneb CO₂-ks ja CaO-ks. Süsinikdioksiidi talletamiseks (CCS = Carbon Capture and Storage) on olemas tehnoloogia, kuid see on kallis. Teisalt tõuseb CO₂ kvoodiühiku hind läbi kasvuhoonegaaside heitkogustega kauplemise süsteemi pidevalt ning seeläbi paraneb ka talletamise konkurentsivõime. Norra tsemenditootja Norcem ehitab maailma esimest tsemenditehase ulatuses teostatavat süsinikdioksiidi püüdmise, transpordi ja ladustamise seadmes-tikku (joonis 2).

Kogutud CO₂ ladustatakse ammendatud naftapuurimisväljal Põhjameres. Investeeringu kogumaksumus on üle miljardi euro. See hõlmab seadmete ehitamist ja käitamist kümne aasta jooksul.

Huvitav on ka võimalus kinnipüütud süsinikdioksiidi ära kasutada (CCU = Carbon Capture and Utilization). CO₂ materjalina maksab ju ligi 100 €/tn. Taaskasu-

tatud CO₂ võiks kasutada näiteks sünteetiliste kütuste tootmiseks. Soomes uuritakse võimalusi toota Finnsementi tsemenditehases kogutud süsihappegaasist ja Kemira tehases tekkivast vesinikust sünteetilist metanooli, mille saaks edasi rafineerida süsinikuneutraalseteks transpordikütusteks.

Lisaks kaltsineerimisel tekkivatele heitmetele tekitab tsemendiklinkri enda põletamisprotsess CO₂ heitmeid. Selles osas on saavutatud tuntavat vähenemist põletamisprotsessi energiatõhususe parandamise ja alternatiivkütuste kasutamise. Teoreetiliselt on võimalik muuta põletamisprotsess väga madalaemissiooniliseks. Tsemendiklinkrit aga põletatakse nii kõrgel temperatuuril (1450 °C), et elektrilise pöördahjuga ei saa seda kulutõhusalt teostada. Kuid praegustes tsemendiahjudes kasutatakse pöördahjule eelnevat kaltsineerimis- või tõusuplokki, kus toimub toorjahu sisalduva lubjakivi kaltsineerimine. Seda kaltsineerimisosas saaks teostada elektriga ja materjal suunatakse seejärel pöördahju klinkri põletamisetappi⁶. Elektriline kaltsineerimisseade vähendaks oluliselt tsemenditootmisel tekkinud süsinikdioksiidiheitmeid. Sedasi võib ka lahus hoida põlemisel tekkivad suitsugaasid ja lubjakivist kaltsineerimisel eralduva süsinikdioksiidi, mis omakorda hõlbustaks süsinikdioksiidi kinnipüüdmist. Süsinikdioksiidi talletamine ei eelda aga kaltsineerimisest ja põletamisest tekkivate heitmete eraldamist, näiteks Brevikis hakatakse süsinikdioksiidi püüdma tehase suitsugaasidest, mis sisaldavad nii kaltsineerimisel kui ka põlemisel eralduvaid gaase.

Elektrilise kaltsineerimisseadme ja süsinikdioksiidi talletamise abil saab tsemendi CO₂ heitkogused viia madalale tasemele, hinnanguliselt 100 kg CO₂/tn lähedale. Tsemenditootmise muutmine madalaemissiooniliseks nõuab suuri investeeringuid ja võtab globaalselt kaua aega. Kuid kohalikult, näiteks Soomes, oleks see võimalik. Investeeringud eeldaksid aga märkimisväärt ühiskonna toetust. Norra

riigil on tsemenditehase süsinikdioksiidi püüdmise, transpordi ja ladustamise infrastruktuuri investeeringus oluline roll.

Madala emissiooniga tsemendi tootmisprotsess tugineks traditsioonilistele portlandtsemendi toorainetele ja seega oleksid tooraine kättesaadavuse probleemid väikesed võrreldes näiteks lisanditega portlandtsementide või alternatiivsete sideainetega tsemendite tootmisega. Samuti oleks tsement ise tuttav ja ohutu. Portlandtsemendi kasutamisel on juba rohkem kui saja-aastane kogemus ja uurimisandmed. Materjali omadused ja ka piirangud on hästi teada. Ka tarnekindluse seisukohalt on tähtis, et tsemendi tootmine Soomes jätkuks tulevikuski.



FOTO: TEMU OJALA / BETON, NR 4

Sideainete kasutamine tulevikus

Nagu eespool mainitud, muutuvad betoonis kasutatavad sideained juba lähitulevikus. Artiklis on sideainete arengus välja toodud kolm erinevat suundumust. Graafikul 1 on näidatud erinevat tüüpi sideainete hinnanguline areng kuni 2035. aastani. Neljas tüüp graafikul on traditsiooniline tsement, mis viitab portlandtsemendile või vähesel lisandiga tsementidele (CEM I ja

Betooni kasutatakse tohututes kogustes. Aastane tarbimine maailmas on u 10 000 000 000 m³ ja Soomes u 5 000 000 m³.

CEM II tüüpi tsemendid).

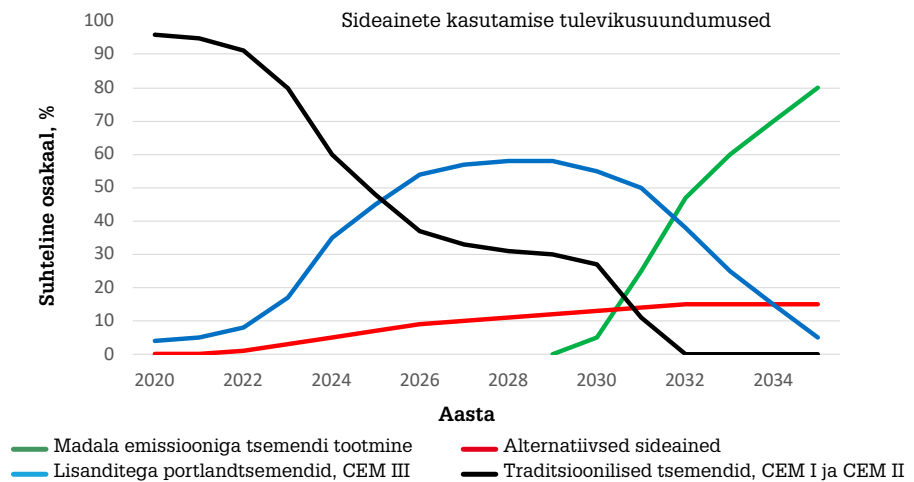
Eeldatakse, et esmalt suureneb lisanditega portlandtsementide hulk ja see vähendab CEM I ning CEM II tüüpi tsementide osakaalu. Siiski ei eeldata, et lisanditega portlandtsemendi kasutamine ületaks 60%, sest lisanditega portlandtsemendid ei sobi igale kasutusobjektile ja ka kõrgahjuräbu kättesaadavus piirab lisanditega portlandtsemendi kasutamist.

Samuti suureneb alternatiivsete sideainete kasutamine, kuid kasv on eeldatavasti suhteliselt aeglane ja alternatiivsete sideainete turuosa jääb vaadeldaval perioodil suhteliselt väikeseks. Eeldused põhinevad asjaolul, et kasutusala piirdub peamiselt väikesemahuliste eritoodetega, sest ehitusnormid piiravad alternatiivsete sideainete kasutamist kandekonstruktsioonides.

Standardite osas olulisi muudatusi silmapiiril ei ole. Ka tooraine saadavus piirab alternatiivsete sideainete laialdast kasutamist. Näiteks kõrgahjuräbu ei tasu leelisaktiveeritud sideainetes olulisel määral kasutada, sest kogu tekkiivat kõrgahjuräbu saab palju lihtsamini kasutada lisanditega portlandtsementides. Alternatiivseid sideaineid uuritakse palju ja seega on täiesti võimalik, et tulevikus saavutatakse olulisi läbimurdeid. Sel juhul võib alternatiivsete sideainete turuosa kasvada näidatust suuremaks.

Märkimisväärne muutus peaks toimuma hinnanguliselt umbes kümne aasta pärast. Siis võiks alata tsemenditootmise muutumine madalaemissiooniliseks. Sel ajal hakkab tõenäoliselt ammendumata ka kõrgahjuräbu saadavus. Muidugi on äärmiselt raske ennustada, millal nii lõpuks juhtub. Kui tahetakse ära kasutada tsemendi heitkoguste vähenemist Soome süsinikuneutraalsuse eesmärgil, peaks tegema investeringud madala süsinikusaldusega tsemendi tootmistehnoloogiasse hiljemalt 2030ndate alguses.

Kui betooni süsinikujalajäljes võetakse arvesse ka karboniseerimisprotsessi süsinikdioksiidi sidu



Graafik 1. Sideainete kasutamise prognoositav edasine areng. Lisanditega portlandtsemendid hõlmavad CEM III tüüpi tsemente, aga ka räbupulbrit kasutavaid sideaineid. Hinnangud põhinevad autori nägemusel tulevikuarengutest.

mõju, oleks betoon madala emissiooniga tsemendi tootmistehnoloogiga 2035. aastal süsinikneutraalne või isegi süsiniknegatiivne materjal.

Kokkuvõte

Betooni sideainetes toimuvad lähiaastatel muudatused seoses vajadusega vähendada betooni CO₂ emissiooni. Selleks pole üht konkreetset lahendust, vaid vähenemist saab saavutada erinevate meetodite kombineerimisega. Lühiajalises perspektiivis on kõige tõhusam viis heitmete vähendamiseks lisanditega portlandtsementide kasutamise suurendamine. Väljakutseks on eelkõige kõrgahjuräbu kättesaadavus.

Samuti suureneb alternatiivsete sideainete kasutamine, kuid eeldatavasti vähemal määral kui lisanditega portlandtsemendi puhul. Alternatiivsete sideainete ka-

sutamist hoiavad tagasi piirangud nende kasutamisele kandekonstruktsioonides. Samuti on tooraine kättesaadavusega sarnased probleemid nagu lisanditega portlandtsemendiga.

Lõplikku lahendust betooni CO₂ heitmete vähendamiseks nähakse portlandtsemendi tootmise muutmises madalaemissiooniliseks. See eeldab nii süsinikdioksiidi püüdmise, transpordi ja ladustamise tehnoloogia kasutuselevõtmist kui ka lubjakivi elektrilist kaltsineerimist ja see tähendab tõeliselt suuri investeringuid. Madala emissiooniga tootmistehnoloogia abil oleks võimalik vältida tooraine saadavusega seotud probleeme, samuti on materjal (portlandtsement) hästi tuntud. Madala emissiooniga tsemendi tootmistehnoloogiat kasutades saaks saavutada betooni süsinikuneutraalsuse 2035. aastaks. **E**

Kasutatud kirjandust

- Hellebois, A., Launoy, A., Pierre, C., De Laneve, M., & Espion, B. 2013. 100-year-old Hennebique concrete, from composition to performance. *Construction and Building Materials* 44, 149-160.
- Rob B. Polder, Timo G. Nijland, Mario R. de Rooij. 2014. Blast furnace slag cement concrete with high slag content (CEM III/B). Experiences with the durability in the Netherlands since the 1920's. *Staten vegvesens rapporteur*. Nr 270
- Finsementti. Ympäristöraportti 2020. Võrguäljaanne: www.finsementti.fi/wp-content/uploads/Finsementti_ymparistoraportti_2020.
- Rakentamisen päästötietokanta. Suomen ympäristökeskus SYKE. Verkkopublikatsio: www.co2data.fi. Luettu 9.11.2021.
- Matala, S. 1995. Effects of carbonation on the pore structure of granulated blast furnace slag concrete. *Espoo*. Helsinki University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Surveying, Concrete Technology, Report 6. 161 p. + app. 49 p.
- Scrivener, K., Nonat, A. 2011. Hydration of cementitious materials, present and future. *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 651.
- Carbon capture and storage (CCS). Norcem. Võrguäljaanne: www.norcem.no/en/CCS. Loetud 9.11.2021.
- Rantanen, H. 2021. Hiili-intensiivisten teollisuusprosessien sähköistämismahdollisuudet. Diplomitöö. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto LUT, Energiatieteiden koulutusohjelma. 63 lk.