

Max Pihlström

Polymeerikuituvahvisteisen ruiskubetonin laatuvaatimukset ja laadunvarmistusmenetelmät kalliorakentamisessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinööriytyö

2.2.2015

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Max Pihlström Polymeerikuituvahvisteisen ruiskubetonin laatuvaatimukset ja laadunvarmistusmenetelmät kalliorakentamisessa 56 sivua + 0 liitettä 2.2.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Infrarakentaminen
Ohjaaja(t)	Lehtori Jouni Kalliomäki Kalliotekniikan osastopäällikkö Kalle Hollmén Rakennesuunnittelutiimin vetäjä Olli Salo
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Saanio & Riekkola Oy:n toimeksiannosta.</p> <p>Muovikuitujen käyttö kalliota lujittavassa ruiskubetonissa on aloitettu maailmalla laajamittaisesti 1990-luvulla. Tätä ennen ja nykyäänkin ruiskubetonissa käytetään teräskuituja vahvistusmateriaalina. Suomessa rakenteellisilla polymeerikuiduilla vahvistetun ruiskubetonin käyttökokemukset kalliorakennuskohteissa perustuvat vain muutamaaan, joskin suureen kohteeseen. Koska rakenteellisilla polymeerikuiduilla vahvistetun ruiskubetonin käyttö on rakennusmaailmassa suhteellisen uutta, on perusteltua tutustua rakenteelta vaadittaviin ominaisuuksiin.</p> <p>Työn tavoitteena on perustella kriteerit polymeerikuituvahvisteisen ruiskubetonin suunnitelma-asiakirjoissa esitettävälle laatuvaatimuksille ja laadunvarmistusmenetelmille sekä tarkastella niiden tarpeellisuutta.</p> <p>Työ toteutettiin tutustumalla ensin alan lähdekirjallisuuteen. Työ tehtiin keräämällä tarvittavat tiedot rakennusalan ohjeistuksista ja standardeista siten, että ne toimivat pohjatietona ruiskubetonin vaatimuksille. Työssä tarkasteltiin erityisesti polymeerikuitujen käyttäytymistä ruiskubetonirakenteessa teräskuituihin verrattuna ja materiaalien välisiä eroja. Kuitujen käyttäytymiseroja tutkittiin Länsimetro-hankkeesta saaduista laattakokeiden tuloksista. Koska polymeerikuitujen käyttäytymismallien tunteminen on Suomessa hyvin pienen asiantuntijaryhmän keskuudessa, olivat työn ohjaajat yrityksen puolelta avainasemassa onnistuneen työn läpiviemiseksi.</p> <p>Tulokset olivat kahdenlaiset eikä yksiselitteisesti voida todeta, kumpi kuitumateriaalityyppi on parempi kalliota lujittavan ruiskubetonin vahvistuksessa. Kuitutyypeillä voidaan vaikuttaa ruiskubetonirakenteen käyttäytymiseen ja valita käyttökohteeseen paremmin sopiva vahvistusmateriaali. Rakenteen huippukuorman tulee kuitenkin aina olla suurempi kuin murtumiskuorman. Molemmissa kuiduissa on hyvät ja huonot puolensa. Polymeerikuitujen riski on niiden vähäinen käyttökokemus ja pitkäaikaisten tuloksien puute.</p>	
Avainsanat	kalliorakentaminen, ruiskubetoni, polymeerikuitu, laatuvaatimus, laadunvarmistusmenetelmä

Author Title	Max Pihlström Quality Requirements and Assurance Methods of Polymer Fibre Reinforced Shotcrete in Rock Engineering
Number of Pages Date	56 pages + 0 appendices 2 February 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Program	Civil Engineering
Specialisation option	Infrastructural Engineering
Instructor(s)	Senior Lecturer Jouni Kalliomäki Department Manager (Rock Technology) Kalle Hollmén Head of Structural Engineering Team Olli Salo
<p>This thesis was commissioned by Saanio & Riekkola Oy.</p> <p>Using plastic fibres in rock reinforcing shotcrete began globally in the 1990's. Steel fibres have been used to reinforce shotcrete before plastic fibres and are used still today. In Finland experiences from using structural polymer fibres to reinforce shotcrete are not well known and are based only on a few projects, which are however large projects. Because using structural polymer fibres to reinforce shotcrete is a relatively new concept in the construction business, it is justified to study the features required of the structure.</p> <p>The goal of this thesis is to justify the criteria presented in plan documents for quality requirements and quality assurance methods for polymer fibre reinforced shotcrete and observe their necessity.</p> <p>This thesis was executed by first studying shotcrete-related literature. Requisite information was collected from standards and instructions of the building trade so that they would form the basis for the requirements set for shotcrete. Especially differences in behaviour of shotcrete structure between polymer fibres and steel fibres and differences between fibre materials were compared. Differences in behaviour were analysed from EF-NARC test reports from the Länsimetro project. Because there is only a limited group of shotcrete specialists in Finland, the instructors were in a key position in enabling the completion of the thesis.</p> <p>There were two kinds of results and it cannot be clearly said which of the fibre type material is better in shotcrete reinforcement to be used in rock reinforcement. By using different type of fibres the outcome of shotcrete behaviour can be regulated, which makes it possible to choose the best option for the intended use. Nevertheless, a structure's maximum load must always be higher than the breaking load. Both of the fibre types have their advantages and disadvantages. The problem in polymer fibres is the limited amount of user experience and lack of long term testing results.</p>	
Keywords	rock engineering, shotcrete, polymer fibre, quality requirement, quality assurance method

Sisällys

Lyhenteitä ja käsitteitä

1	Johdanto	1
1.1	Tausta ja tavoitteet	1
1.2	Työn rajaus	1
1.3	Tutkimusmenetelmä	2
1.4	Kirjallisuus	2
1.5	Opinnäytetyön tilaaja	2
2	Ruiskubetonirakenne	4
2.1	Ruiskubetonin toimintaperiaate	4
2.1.1	Ruiskubetoni materiaalina	4
2.1.2	Ruiskubetonin toimintaperiaatteet	4
2.1.3	Ruiskubetonirakenteen valmistusmenetelmät	6
2.2	Ruiskubetonin murtumisperiaatteet	7
2.2.1	Tartunnan irtoaminen	8
2.2.2	Taivutuskapasiteetin ylittyminen	8
2.2.3	Betonikerroksen leikkautuminen	8
2.3	Betonirakenteiden suunnittelu	8
2.3.1	Ruiskubetonirakenteen suunnittelun lähtökohdat	9
2.3.2	Ruiskubetonin mitoitus	12
2.4	Ruiskubetonin vahvistusmenetelmät	12
2.4.1	Teräskuidut	13
2.4.2	Polymeerikuidut	15
3	Kalliota vahvistavan ruiskubetonin laadunvarmistusmenetelmät	17
3.1	Laadunvarmistuksen perusteet	17
3.2	Laadunvarmistuskokeet eri vaiheissa	18
3.2.1	Notkeus	20
3.2.2	Kuitumäärä	21
3.2.3	Puristuslujuus	22
3.2.4	Tiheys	25
3.2.5	Paineellisen veden tunkeumasyyvyys	26
3.2.6	Energian absorptiokapasiteetti	26
3.2.7	Pakkasenkestävyys	31

3.2.8	Ruiskubetonin koostumuksen vaatimukset	33
3.2.9	Paksuuden mittaus	34
3.2.10	Rakennekoekappaleet	34
3.2.11	Tartunta	35
4	Polymeerikuituvahvisteinen ruiskubetoni	37
4.1	Kuitumateriaalien toimintaerot	37
4.1.1	Energian sitominen	37
4.1.2	Kuitujen muoto	41
4.1.3	Kuitujen tartunta	42
4.1.4	Betonilaatu	42
4.1.5	Kimmokerroin	44
4.1.6	Kuitutyypien vertailu	45
4.2	Kuidut käyttöympäristössä	47
4.2.1	Viruma & korroosio	47
4.2.2	Käyttöikä	48
5	Yhteenveto	50
5.1	Laadunvarmistusmenetelmät	50
5.2	Laatuvaatimukset	52
5.3	Pohdintaa	53
5.4	Loppusanat	53
	Lähteet	54

Käsitteitä ja lyhenteitä

EFNARC	Laattakoe, jolla mitataan testilaatan energianabsorptiokapasiteettia. Energianabsorptiokapasiteetti on lukuarvo, joka ilmoittaa keskipisteestä kuormitetun neliön muotoisen laatan taivutuksessa absorboiman energian jouleissa. Energianabsorptiokapasiteetin avulla voidaan arvioida rakenteen sitkeysominaisuuksia. [SFS-EN 14488-5]
Hukkaroiske	Ruiskutuskaluston suuttimesta lähteneen massan ja ruiskutuspintaan jääneen massan välinen erotus. [Kaivannaisteollisuusyhdistys ry.]
Kiihdytin	Ennen ruiskutusta tuoreeseen massaan lisätään suuttimessa lisäaine, joka nopeuttaa betonin sitoutumista ja/tai kovettumista. Kiihdytin nimensä mukaan kiihdyttää betonin lujuudenkehitystä. [By201/2004]
Lisäaine	Materiaalia, joka lisätään betonin sekoitusprosessin aikana korkeintaan 5 % betonin sisältämän sementin massasta ja jolla muunnetaan seoksen ominaisuuksia tuoreena ja/tai kovettuneena. [SFS-EN 14487-1]
Notkistin	Notkistinta käytetään nimensä mukaan lisäämään betonin notkeutta ja vedenvähentämiseen. Tällöin betonin työstettävyyttä paranee tai betonin lujuus nousee, kun vesisementtisuhte pienenee. Samalla myös betonin tiiviys paranee. Notkistimilla saadaan vähennettyä veden määrää 5...30 %, ilman että työstettävyyttä heikkenee. [Finnsementti]
Perusseos	Sementin, kiviainesten ja minkä tahansa betonin ainesosien seos, joka syötetään ruiskutuskoneeseen, lukuun ottamatta suuttimessa lisättäviä komponentteja. Perusseos voi olla kuiva tai märkä. [SFS-EN 14487-1]
Rusnaus	Louhinnan seurauksena syntyneen rikkonaisen kiviaineksen irrottaminen kalliosta. [Kaivannaisteollisuusyhdistys ry.]

Seosaine	Hienojakoiset materiaalit, joita käyttämällä parannetaan betonin tiettyjä ominaisuuksia tai saadaan aikaan erityisominaisuuksia. [SFS-EN 14487-1]
Tartuntalujuus	Kahden rakennekerroksen välinen vetojännityksen siirtokapasiteetti. Suurin voima, jolla ruiskubetonia voidaan kuormittaa ilman, että se irtoaa kalliosta. [Malmgren L. et al. 2004]

1 Johdanto

1.1 Tausta ja tavoitteet

Rakenteellisilla polymeerikuiduilla vahvistetun ruiskubetonin käyttökokemukset kallio-rakennuskohteissa Suomessa perustuvat vain muutamaan, joskin suureen kohteeseen. Näin ollen on tarpeellista määrittellä perustellusti rakenteelta vaadittavat ominaisuudet käytännön kokemusta hyödyntäen. Tavoitteena on saada mahdollisimman hyvin toimiva ja käyttötarkoitukseen soveltuva rakenne. Ennen polymeerikuituja ruiskubetonin vahvistusmateriaalina käytettiin teräskuituja, joita käytetään vielä tänäkin päivänä.

Tämän insinööriyön tavoitteena on perustella kriteerit kalliota lujittavan polymeerikuituvahvisteisen ruiskubetonimassan suunnitelma-asiakirjoissa esitettäville laatuvaatimuksille ja laadunvarmistusmenetelmille sekä tarkastella niiden tarpeellisuutta. Työssä tuodaan esille teoriatarkastelun avulla oleelliset seikat ja niiden tärkeys ruiskubetonin laatuvaatimuksissa ja laadunvarmistusmenetelmissä ja vertailla polymeerikuitujen ja teräskuitujen käyttäytymiseroja.

Ruiskubetonirakenteen koestus suoritetaan standardeissa esitettyjen määräysten mukaisesti, jotka ovat osoittautuneet käytännön kokemuksen mukaan hyvin työläiksi varsinkin suuremmissa hankkeissa. Koska kokeiden määrä on suuri ja kokeet joudutaan tekemään käsityönä, vievät ne aikaa urakan muista työvaiheista. Työssä pohditaan, onko kaikkien kokeiden tekeminen täysin perusteltua hankkeen aikana.

Tämän työn kanssa yhtä aikaa on päivittymässä InfraRYL:n ruiskubetonointia koskeva luku (15300) sekä valmistumassa Betoniyhdistyksen ruiskubetoniohjeet 63/2015. Kaikkia näistä tulevia muutoksia tai ohjeita ei välttämättä ole voitu huomioida tässä työssä.

1.2 Työn rajaus

Tässä insinööriyössä keskitytään vain kalliota lujittavaan rakenteelliseen ruiskubetoniin. Työssä tutkitaan toteutusasiakirjoja laatuvaatimusmäärittelyjen osalta kalliorakennesuunnittelijan näkökulmasta. Tässä työssä keskitytään kuituihin ja nimenomaan polymeerikuitujen tapauksessa rakenteellisiin polymeerikuituihin. Työn ulkopuolelle raja-

taan mikrokuituvahvisteinen ruiskubetonimassa, uusien kokeiden ohjelmointi, ruiskubetonin mitoituskalkulat ja toteutukseen liittyvät näkökulmat sekä vahvistuskuitujen materiaalmäärittelyt. Työstä rajataan ulkopuolelle myös työvaiheet (ml. jälkihoito). Rakenteiden korjauksista tai erillistä verhouksrakennetta ei käsitellä työssä.

1.3 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyö perustuu kirjallistutkimukseen sekä alan ammattilaisten haastatteluihin ja heidän antamaan ohjaukseen. Tässä työssä käytetään hyväksi myös hyväksi käytännön kokemusten perusteella saatua tietoa.

Työssä on perehdytty ensin alan lähdekirjallisuuteen huomioiden polymeerikuitumas-
san viimeisimmät tutkimustulokset sekä olemassa oleviin suunnitelma-asiakirjoihin ja asiantuntijahaastatteluihin. Työssä käytiin läpi myös aiemmissa hankkeissa tehtyjen kokeiden tuloksia ohjaajien avustuksella.

Työ koostuu teoriaosuudesta, jossa käsitellään ruiskubetonirakenteen toimintaa, kirjallisuuteen perustuvia vaatimuksia ja mitoitusperusteita. Työn loppuosassa esitetään edellisten pohjalta perusteet laatuvaatimukselle ja laadunvarmistusmenetelmille.

1.4 Kirjallisuus

Tutkimusaineistona käytetään suunnittelutoimiston käytössä olevia tyypillisiä laatu-asiakirjoja. Kansalliset standardit toimivat myös tämän insinöörityön kirjallisuuslähteinä. Polymeerikuitujen ja teräskuitujen käyttäytymiseen kuormituksen alla on paneuduttu yrityksen aikaisemmista hankkeista saatujen testituloksien avulla.

1.5 Opinnäytetyön tilaaja

Vuonna 1962 perustettu Saanio & Riekkola Oy tuottaa infrastruktuurin ja ympäristön suunnitteluun sekä rakennuttamiseen ja energiatekniikkaan liittyviä konsultti- ja asiantuntijapalveluja. Toimiston erityisosaamista ovat kalliotilojen suunnittelu, ydinjätteen loppusijoitustekniikka, LVIA-suunnittelu ja rakennesuunnittelu.

Saanio & Riekkola Oy on Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL ry:n jäsen. Henkilökunnan lukumäärä on noin 65 ja liikevaihto 6,5 miljoonaa euroa. Saanio & Riekkola Oy kuuluu A-Insinöörit-yhtiöryhmään.

Pääosa yrityksen hankkeista on kotimaisia. Helsingin ydinkeskustan kalliotilat ja ydinjätteen loppusijoitustilat Olkiluodossa ovat esimerkkejä Saanio & Riekkolan erikoisosaamisesta. Suunnitteluvientiä toimistolla on pääasiassa Ruotsiin ja Etelä-Koreaan.

2 Ruiskubetonirakenne

2.1 Ruiskubetonin toimintaperiaate

2.1.1 Ruiskubetoni materiaalina

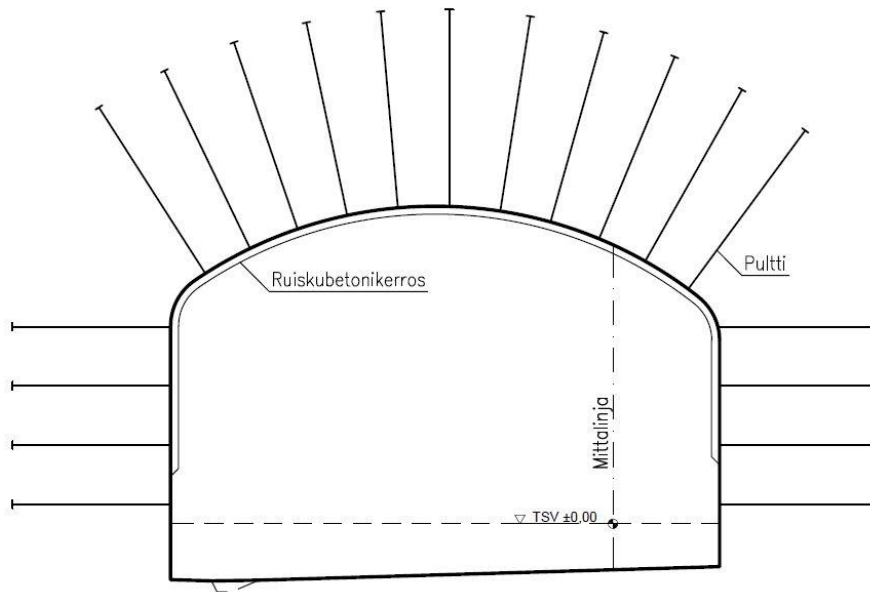
Hollménin [2014] mukaan ruiskubetonointia käytetään louhittujen kalliotilojen sekä maa- ja kallioluiskien lujituksena ja tuentana sekä kantavana rakenteena. Ruiskubetonointia käytetään myös pintojen vahvistuksessa ja korjaustöissä. Ruiskubetonointia voidaan myös käyttää kalliotiloihin tehtävässä verhourakenteessa.

Salon [2010] mukaan ruiskubetonimassa koostuu sementistä, kiviaineksesta ja vedestä. Massa ruiskutetaan paineilman avulla suurella nopeudella suuttimen läpi lujitettavalle pinnalle. Ruiskubetoniseoksessa käytetään normaalisti myös lisäaineita parantamaan massan ominaisuuksia (esim. notkistin ja kiihdytin) ja useasti kuituja, jotka lisäävät rakenteen sitkeyttä ja vetokapasiteettia. Ruiskubetoni on materiaalina melko tiivis, jolloin se vähentää tunnelipinnoilla olevia vesivuotoja.

Kuituvahvistettu ruiskubetoni koostuu suurelta osin vedestä, sementistä, kiviaineksesta, lisäaineista ja kuiduista. Salon [2010] mukaan lisäaineiden rooli kuituvahvistetussa betonissa on tärkeämpi kuin kuiduttomassa betonissa, etenkin notkistimen osalta. Perinteisesti ruiskubetonin vahvistamiseen käytettävät kuidut on valmistettu joko teräksestä tai orgaanisista polymeereistä, mutta on myös muita kuitumateriaaleja. Kuitujen tehtävä on parantaa kovettuneen ruiskubetonirakenteen energian absorptiokapasiteettia, taiputuskapasiteettia ja rajoittaa rakenteen kutistumishalkeilua.

2.1.2 Ruiskubetonin toimintaperiaatteet

Kallion lujituksessa ruiskubetonin pääasiallisena tehtävänä on kannatella lujituspulttien välinen kalliomassa. Ruiskubetoni myös estää heikkolaatuisen kallion löyhtymistä ja sitoo kalliolohkoja toisiinsa. Kuvassa 1 on esitetty rakennekuva erään hankkeen lujitus suunnitelmasta, jossa ruiskubetoni toimii yhdessä pultituksen kanssa. Kuvassa RBM tarkoittaa ruiskubetonointia märkäruiskutusmenetelmällä, KP tarkoittaa polymeerikuitutyyppiä ja JAP tarkoittaa jälki-injektoitavaa ankkuripulttia. Ruiskubetonikerros esiintyy kuvassa teoreettisen louhintaviivan tunnelin puolella.



Pultitus

Holvi: JAP T25 L=5000 mm
 Seinät: JAP T25 L=4000 mm
 Viuhkaväli 1300 mm

Ruiskubetonointi:

Välitön ruiskubetonointi:

Holvi: RBM 50KP (piiri 16279 mm)
 Seinät: RBM 50KP (piiri 5012 mm + 4648 mm)
 Seinien välitön ruiskubetoni ulotetaan tasausviivaan.

Lopullinen ruiskubetonointi:

Holvi: RBM 120KP (piiri 16279 mm)
 Seinät: RBM 80KP (piiri 3811 mm + 3148 mm)

Kuva 1. Lujitusprofiili (Kuva erään hankkeen lujitussuunnitelmasta)

Standardin SFS-EN 14487-1 mukaan ruiskutubetoni muodostaa pinnalle tiiviin, homogeenisen ja määritellyn paksuisen kerroksen. Ruiskubetonin käyttö on perusteltua, kun valubetonin valmistaminen ei onnistu. Tällöin betonointityö voidaan järjestää yksipuolisen muotin avulla. Kun ruiskubetoni ruiskutetaan kallion tai olemassa olevan rakenteen pintaan, ei muotteja tarvita.

Mäkelän [2007] mukaan ruiskubetonin lujittavaa toimintaa voidaan kuvata seuraavasti.

- Ruiskubetoni lujittaa ja jäykistää kallion pintaa täyttämällä kallion rakoja ja halkeamia, tehden siitä yhtenäisemmän. Ruiskubetonirakenteen toiminta perustuu betonin leikkaus- ja tartuntalujuuteen kallion raoissa.
- Ruiskubetoni siirtää kuormia ehjälle kalliolle leikkaus- ja tartuntajännityksen avulla.
- Ruiskubetonirakenne ottaa vastaan taivutus- ja vetojännityksiä betonin tartunnan ollessa heikko.

2.1.3 Ruiskubetonirakenteen valmistusmenetelmät

Pöllän [1988] mukaan ruiskubetonirakenteen toiminnan kannalta tartunta on avaintekijä. Tartunta syntyy ruiskutettaessa suurella paineella massaa kallion pintaan. Suuremmat kiviainekset kimpoavat pois kallion pinnasta, jolloin massan hienommat ainekset tunkeutuvat kalliopinnan huokosiin, halkeamiin ja rakoihin. Näin kallion pintaan muodostuu ohut laastikerros, joka toimii sitovana kerroksena kallion ja betonikerroksen välillä.

Ennen ruiskutusta kallion pinta on puhdistettava epäpuhtauksista. Louhinnan jälkeen kalliosta rusnataan pois valmiiksi irti oleva kiviaines. Kuten kuvassa 2 esitetään, ruiskutettava pinta pestään vedellä suurella paineella, jotta päästään eroon pölystä, rakotäyteistä ja irtokivistä. Ruiskutettavan pinnan puhdistukseen voidaan myös käyttää hiekkapuhallusta. Pöllän [1988] mukaan tartuntaan vaikuttaa mm. kiven mineraalikoostumus, pinnan karheus, betonin koostumus sekä ruiskutetun pinnan jälkihoito. Kalliopinnoilla saavutettava tartunnan yläraja on 3 N/mm^2 .



Kuva 2. Kallion puhdistus ennen ruiskutusta [Kuva: Pihlström 2013]

Ruiskutusmenetelmät voidaan jakaa pääsääntöisesti kahteen eri menetelmään. Hollménin [2014] mukaan märkäruiskutusmenetelmässä työmaalle tuodaan valmiiksi betonitehtaalla sekoitettu massa, joka koostuu vedestä, sementistä ja kiviaineksesta. Ruiskutuskalustosta käsin voidaan määrittää massassa käytettävän kiihdyttimen määrä. Muut massassa käytettävät lisäaineet annostellaan betonitehtaalla. Menetelmän etuna on massan tasalaatuisuus ja siihen voidaan lisätä rakennetta vahvistavat kuidut jo tehtaalla.

Hollménin [2014] mukaan kuivaruiskutuksessa sementti ja kiviaines sekoitetaan ja painistetaan ennen ainesosien johtamista suuttimeen, jossa vesisuihku lisätään mukaan kuivaan massavirtaan. Kuivaseos voidaan valmistaa työmaaolosuhteissa tai vaihtoehtoisesti se voidaan tilata valmiina tehtaalta. Kuivaruiskutusmenetelmässä käytetään myös lisäaineita. Koska kuivaruiskutuksessa ei käytetä kuituja, vahvistetaan ruiskubetonia rakenneteräksillä, jotka ankkuroidaan kallioon.

Vaikkakin ruiskubetonoinnissa on siirrytty pitkälti märkäruiskutusmenetelmään Salon [2010] mukaan, on kuivaruiskutusmenetelmän käyttö edelleen perusteltua käyttökohteen asettaessa haasteita kaluston osalta. Kuivaruiskutusmenetelmä sopii pieniin, ahtaisiin ja hankaliin paikkoihin (esim. kuilut), joihin on vaikea järjestää märkäruiskutusmenetelmään vaadittava kalusto. Kuivaruiskutus voidaan järjestää miestyönä ja sekä vesi että kuivamassa voidaan toimittaa ruiskutuskohteeseen pelkkien letkujen avulla. Kuvassa 3 on havainnollistettu märkäruiskutusmenetelmässä käytettävä kalusto: ruiskutuskalusto ja betoniauto.



Kuva 3. Ruiskubetonointi märkäseosmenetelmää käyttäen [Kuva: Pihlström 2013]

2.2 Ruiskubetonin murtumisperiaatteet

Mäkelän [2007] mukaan mekaaninen murtuma johtaa ruiskubetonirakenteen lujituskapasiteetin ylittymiseen. Näitä murtumia voidaan tarkastella murtumismallien avulla. Yleisimmin murtuminen on näiden tarkastelumallien yhdistelmä.

2.2.1 Tartunnan irtoaminen

Ruiskubetonirakenteen toiminta perustuu suurilta osin ruiskubetonin ja kallion väliseen tartuntaan. Mäkelän [2007] mukaan lujittava vaikutus katoaa yleisimmin ruiskubetonin ja kalliopinnan välisen tartunnan irrottua. Kun tartunta on kadonnut ruiskubetonin ja kallion pinnan välistä, rako levenee niin kauas, kunnes riittävä tartuntakapasiteetti jälleen saavutetaan. Tartuntavoima riippuu tartuntapinta-alasta. Tartuntakapasiteetin on oltava vähintään rakenteen kantavan kappaleen painon suuruinen.

2.2.2 Taivutuskapasiteetin ylittyminen

Mäkelän [2007] mukaan vahvistetun ruiskubetonin taivutuskapasiteetti on suurempi kuin tartuntakapasiteetti. Kun tartunta pettää ja rako ruiskubetonin ja kallion pinnan välissä kasvaa liian suureksi, alkaa ruiskubetonirakenne taipua. Tällöin ruiskubetonirakenteen taivutuskapasiteetti asettaa rajat rakenteen kestävyydelle. Vahvistamattomalla ruiskubetonilla ei oleteta olevan taivutuslujuutta, koska sillä ei ole vetolujuutta murtorajatilassa. Täten käytettävä ruiskubetonityyppi on aina valittava käyttötarkoituksen mukaan.

2.2.3 Betonikerroksen leikkautuminen

Mäkelän [2007] mukaan ruiskubetonikerroksen leikkaantuminen on harvoin yksinomaan syy rakenteen pettämiseen, johtuen betonin suuresta leikkauskapasiteetista. Rakenne leikkautuu, kun leikkausvoima ylittää rakenteen leikkauskapasiteetin. Leikkausvoima syntyy kalliolohkon painaessa ruiskubetonia alaspäin ja tartuntavoiman pitäessä rakennetta kiinni ehjässä kalliopinnassa.

2.3 Betonirakenteiden suunnittelu

Ruiskubetonirakenteen luotettavuuden tasoluokitusta varten voidaan määritellä taulukon 1 mukaiset seuraamusluokat (CC) tarkastelemalla rakenteen vaurion tai vian seuraamuksia.

Taulukko 1. Eurokoodin 0: Suunnittelun perusteiden mukaiset seuraamusluokat [SFS-EN 1990 + A1 + AC]

Seuraamusluokka	Toteutusluokka	Kuvaus
CC3	3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia
CC2	2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia
CC1	1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia

Suunniteltaessa seuraamusluokan CC1 betonirakenteiden kantavuutta, saadaan käyttää korkeintaan betonin lujuusluokkaa C20/25.

Suunnitelmissa tulee esittää standardin SFS-EN 13670 mukainen betonirakenteiden toteutusluokka.

Kansallinen standardi SFS 5975 antaa suosituksia betonirakenteiden toteuttamista koskevan standardin SFS-EN 13670 soveltamisesta Suomessa.

2.3.1 Ruiskubetonirakenteen suunnittelun lähtökohdat

Kalliotilan käyttötarkoitus luo Hollménin [2014] mukaan vaadittavat ominaisuudet ruiskubetonirakenteelle ja rakenteen käyttötarkoitus antaa suunnan sen mitoitukselle. Esimerkiksi lyhyen käyttöiän kalliotilaan tarvitaan nopeasti ja kustannustehokkaasti turvaliset työolosuhteet tai vaihtoehtoisesti liikennöitävään tunneliin tarvitaan pitkäaikainen suoja. Kalliorakenne mitoitetaan lähtökohtaisesti laskemalla kuormituskapasiteetti todellisissa olosuhteissa, joka määrää kerrospaksuuden. Verhousrakenteissa paloturvallisuus määrää vähimmäisrakennepaksuuden.

Ruiskubetonirakenteen tiiveydellä tarkoitetaan rakenteen kykyä estää veden kulkeutusta sen läpi. Riippuen suunniteltavan rakenteen sijainnista pohjaveteen, käyttötarkoituksen määräämät ominaisuudet ovat tärkeämpiä kuin rakenteen tiiveys. Hollménin [2014] mukaan esimerkiksi työnaikaisen ajotunnelin tiiveydellä ei ole niinkään merkitystä mutta yleisötiloissa (mm. metroasemat ja parkkihallit) puolestaan on.

Ruiskubetonirakenteen tiiveyteen vaikuttaa rakenteen paksuus, huokoisuus, siihen poratut reiät ja siinä mahdollisesti olevien halkeamien määrä sekä niiden koko.

Pysyvissä kallioiloissa rakennekerrospaksuuden määrittää Salon [2014] mukaan kallioista aiheutuva kuormitus ja verhousrakenteen tiiveysvaatimukset. Tiiviin ruiskubetonirakenteen sekä kalliopinnan ja ruiskubetonin väliin asennettujen ruiskubetonisalojien avulla saadaan vuotovedet ohjattua pois rakenteesta ja johdettua vuodot pohjan salaojakerrokseen. Kuvassa 4 on esitetty salaojat, jotka jäävät ruiskubetonin ja kallion väliin.



Kuva 4. Asennetut salaojat [Kuva: Pihlström 2013]

Pysyvien tilojen louhinnan aikainen lujitustyö suunnitellaan etukäteen. Näin varmistetaan työturvallisuudesta louhinnan aikana. Louhinnan keskeyttävä lujitus vaatii Salon [2010] mukaan aina hyvän muodonmuutoskapasiteetin louhinnan tärinöiden ja dynaamisten kuormien sekä louhinnasta johtuvien kallion jännitystilojen tasaantumisen takia. Pysyviä rakenteita jo suunniteltaessa on pyrittävä ehkäisemään rakenteen halkeilu käyttötarkoituksen mukaisilla rakenneratkaisuilla. Käyttöön otetun tilan korjaus on kallista ja se aiheuttaa häiriöitä tilan normaalille käytölle. Täten pysyvät tilat tulee suunnitella siten, ettei niitä tarvitsisi korjata käyttöiän aikana.

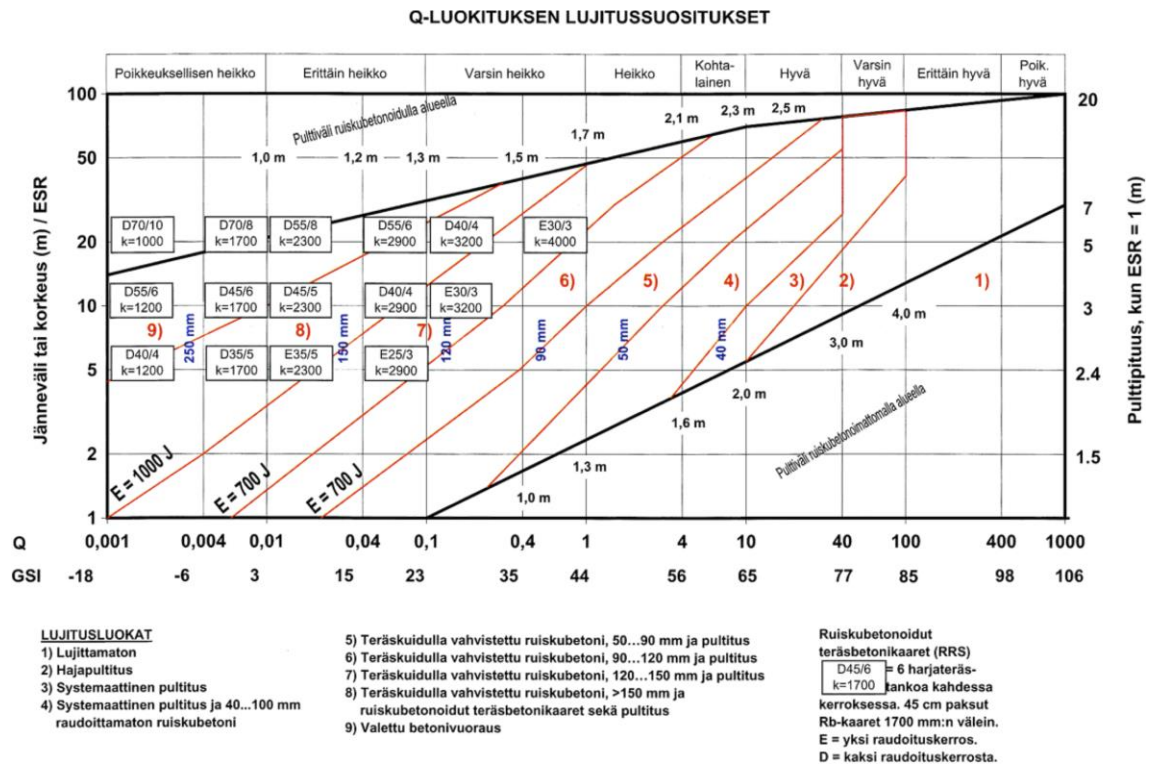
Pysyviä tiloja louhittaessa pyritään louhintatyö suunnittelemaan ja toteuttamaan siten, että se häiritsee ympäröivää kallioperää mahdollisimman vähän. Mikäli louhintatyön tehokkuus on tärkeämpää kuin ympärillä olevan kallion yhtenäisyyden säilyttäminen, toimii ruiskubetoni rakenteellisesti kuitenkin käyttötarkoituksesta riippumatta samojen sääntöjen mukaan. Salon [2010] mukaan yhdessä kalliopulttien kanssa ruiskubetoni

mahdollistaa kalliotilan käyttötarkoituksen mukaisen turvallisen käytön ja odottamattomiin muutoksiin reagoimisen ennen rakenteen rikkoutumista. Kalliosta pultitukselle ja ruiskubetonirakenteelle aiheutuvat jännitykset pienenevät nopeasti muodonmuutoksen kasvaessa. Kun muodonmuutokset ovat tapahtuneet, kallio asettuu uuteen tasapainoasemaan, jossa voi kestää hyvinkin kauan. Tällöin ruiskubetonikerros voidaan korjata ja tilan käyttöä voidaan jatkaa.

Kalliorakenteiden suunnittelussa käytetään laajalti hyödyksi erilaisia kalliolaatuluokitteluja, joista Suomessa yleisin on Norjalaisen Nick Bartonin vuonna 1974 esittelemä menetelmä, jossa kalliolaatu on kuvattavissa yhden numeerisen lukuarvon (Q-luku) avulla. Tämä menetelmä sopii hyvin skandinaavisen kiteisen kallioperän luokitteluun. Q-luvun määrittämiseksi tarkastellaan kallion ominaisuuksia seuraavilta osilta: rakojen lukumäärätekijät (R_{QD} ja J_n), rakopintojen ominaisuudet (J_r ja J_a), vesivuodot (J_w) sekä jännitystilä (SRF). Kalliolaatua kuvaava logaritminen Q-luku vaihtelee välillä 0,001 (poikkeuksellisen heikko) ja 1000 (poikkeuksellisen hyvä).

Barton [1974] on kehittänyt myös Q-lukuun perustuvan lujitussuosituksen, jossa kalliotilan käyttötarkoituksen, jännevälän ja kalliolaadun perusteella voidaan arvioida tarvittava kallion lujitus (pultitus ja ruiskubetonointi). Menetelmässä on taulukoitu tilastollisesti muutaman tuhannen kohteen kalliolaadun ja lujitusten vaihtelu.

Kuvassa 5 on esitetty Q-luokituksen lujuussuositukset kalliotilojen lujituksen suunnittelusta varten, joka toimii hyvänä karkeana ohjeistuksena pultituksen ja ruiskubetonin osalta. Alkuperäisen taulukon julkaisemisen jälkeen vuonna 1974 (Barton) taulukkoa on päivitetty kahteen otteeseen vuosina 1993 (Grimstad ja Barton) ja 2002 (Grimstad et al.). Molempien päivitysten takana on ollut uusista lujituskohteista saatujen lisätietojen hyödyntäminen. Näin taulukosta saatava lujitussuositus vastaa entistä tarkemmin oikean suuntaista lujitusmenetelmää.



Kuva 5. Pysyvän lujuksen suositukset perustuen Q-lukuun ja jänneväliin [Grimstad et al. 2002]

2.3.2 Ruiskubetonin mitoitus

Bernardin [2008] mukaan ruiskubetonin pysyvää lujuutta mitoitettaessa suunnittelun lähtökohdaksi voidaan pitää Q-lukutaulukkoa ja ruiskubetonin murtumistapojen tuntemista. Mitä pidempi rakenteen käyttöikä tulee olemaan, sitä varmempi rakenteen tulee olla. Käytön aikana rakenteen kuntoa tulee tarkkailla ja vahvistaa tarvittaessa.

2.4 Ruiskubetonin vahvistusmenetelmät

Betonin vetolujuus on vain noin 10 % sen puristuslujuudesta. Sen takia ruiskubetonirakenne sellaisenaan ilman vahvistusta ei ole optimaalinen lujuusmenetelmä kallioisissa, sillä ruiskubetoniin kohdistuu myös vetorasitusta. Rakennetta voi tarkastella samoin kuin normaalia betonipalkkia: kuormituksen alaisena palkin yläpintaan muodostuu puristusta ja alapintaan vetoa. Ratkaisuna on lisätä palkin alapintaan jänneteräksiä, jotka ottavat vastaan palkkiin muodostuvan vetojännityksen. Sama pätee puristetun ruiskubetonirakenteen tarkasteluun. Lisäämällä vahvistekuituja ruiskubetoniin, voidaan sen vetolujuutta kasvattaa. Salon [2010] mukaan kuidut parantavat betonin veto- ja leikka-

uslujuutta, jonka seurauksena myös puristuslujuus kasvaa verrattuna kuiduttomaan betoniin.

Ruiskubetonin kanssa voidaan käyttää harjaterästankoja, mutta ne on asennettava ruiskutettavaan pintaan ennen ruiskubetonin valua. Näin voidaan menetellä Hollménin [2014] mukaan esimerkiksi avoleikkauksilla, mutta taloudellisista syistä siihen harvemmin päädytään. Ruiskubetonissa harjateräkset korvataan kuiduilla kasvattamaan betonin vetolujuutta. Kuidut ovat kooltaan tarpeeksi pieniä kulkemaan massan mukana ruiskutuskaluston läpi, mutta rakenteen sisällä muodostaessaan kuituverkon ne ovat tarpeeksi vahvoja ottamaan vastaan vetolujuuden aiheuttamat jännitykset. Kalliopintoihin voidaan sitoa harjaterästankoja vetolujuuden parantamiseksi, mikäli ruiskutuskohteeseen vaatii sitä muotonsa puolesta, mutta tehokkaampaa on käyttää edellä mainittuja teräsverkkoja.

Ennen kuitujen käyttöä ruiskubetonin vahvistuksena on Salon [2014] mukaan ollut käytössä kallioon kiinnitettävä teräsverkko, johon ruiskubetonimassa ruiskutetaan. Tätä vahvistusmenetelmää käytetään edelleen kuivaseosmenetelmän yhteydessä sekä erityyppisissä heikoissa kalliolaaduissa myös märkäseosmenetelmässä tai paikoissa, jossa tarvitaan äärimmäistä taivutuskapasiteettia (esim. tunnelin otsan ruiskubetonipalkit, kaivokset). Tällä menetelmällä rakenteelle saadaan yksi ylimääräinen tartunta ruiskubetonin oman tartunnan lisäksi kallioon ja rauditus on tasalaatuista ruiskutettavalla alueella. Teräsverkon huono puoli on sen asennuksen ylimääräinen työvaihe työmaalla. Tämä työvaihe on työturvallisuuden näkökulmasta riskitekijä, koska toimitaan lujittamattomassa kallio-tilassa. Tähän työvaiheeseen on kehitetty verkotuskoneita, joilla päästään hyviin työtehoihin. Näitä työkoneita on Suomessa muutama kappale kaivoksilla, joten suurin osa asennustyöstä tehdään kuitenkin käsin. Asennusvaihe on hankala, aikaa vievä ja kallis toteuttaa.

2.4.1 Teräskuidut

Teräskuitujen laajamittainen käyttö ruiskubetonissa yleistyi maailmalla 1970-luvulla. Teräskuitujen käytöllä säästetään huomattavasti kustannuksissa verrattuna teräsverkon käyttökustannuksiin. Salon [2010] mukaan teräskuitujen ominaisuuksina ovat suurempi vetolujuus ja kimmokerroin sekä ne vastustavat virumaa, paremmin kuin polymeerikuidut. Niiden pehmenemis- ja sulamislämpötila ovat huomattavasti korkeampi kuin polymeerikuiduilla. Tämä ei tarkoita suoraan, että mitä kovempi materiaali, sitä

paremmin se sopii vahvistusmateriaaliksi ruiskubetoniin. Korroosio on palamista eli aineen yhtymistä happeen. Teräskuidut ruostuvat, mikäli ympärillä olevaan betoniseen suojakerrokseen syntyy halkeamia ja rakenteen sisään pääsee kosteutta ja hapetta. Teräskuiduilla vahvistetun ruiskubetonin päälle ruiskutetaan useasti kuiduton ruiskubetonikerros suojakerrokseksi. Suojakerroksen tarkoitus on suojata vahvistavaa ruiskubetonikerrosta korroosiolta ja tilan käyttäjää teräviltä, ruiskubetonirakenteesta esiin työntyviltä teräskuiduilta.

Betoni on materiaalina emäksinen, joten se toimii suojakerroksena raudoitukselle. Salon [2010] mukaan suojakuori muodostaa emäksisen huokosveden kanssa passiivikalvon raudoituksen pinnalle ja hidastaa korroosioon tarvittavien aineiden kulkeutumista raudoitukseen. Kun betonin pH laskee alle 9:n, passiivikalvo häviää ja raudoitus on alttiina korroosiolle. Korroosio tapahtuu kun rauta reagoi hapen ja veden kanssa. Tämä reaktio ei tapahdu, mikäli hapetta ja vettä ei ole saatavilla. Tämän takia suojakuorena toimiva betonirakenne tulee suunnitella vettä läpäisemättömäksi.

Betonitekniikan oppikirjan By201/2004:n mukaan korroosiossa syntyvien reaktiotuotteiden tilavuus on noin nelinkertainen lähtöaineisiin verrattuna. Tämä aikaan saa betonin sisäisiä jännityksiä ja lopulta rakenne halkeaa. Halkeamisen johdosta rakenne saattaa joutua pahimmassa tapauksessa suojaamattomana ympäristölle. Mikäli halkeamat ovat vahvistusten suuntaisia, ne huonontavat tartuntaa ja voivat aiheuttaa tartunnan täydellisen pettämisen. Korroosiossa vahvistusmateriaalin pinta-ala pienenee, josta seuraa merkittävä rakenteen kestävyysominaisuuksien heikkeneminen. Mikäli raudoituksessa on vetoa, se syöpyy huomattavasti nopeammin. Koska raudoituksen heikkenemisestä ei synny välttämättä lohkeilua rakenteen pinnassa, on niiden havaitseminen hyvin hankalaa. Edellä mainittu skenaario ruiskubetonin kestävyysominaisuuksien pettämisestä on kuitenkin hyvin teoreettinen.

Märkäruiskutusmenetelmä on tänä päivänä käytetyin ruiskubetonointimenetelmä. Teräskuitujen käytön vaikutus ruiskubetonointi kaluston kulumiseen on teoreettisesti suurempi kuin polymeerikuituja käytettäessä, koska polymeerikuidut ovat pehmeämpää materiaaliltaan kuin teräskuidut. Kuidut voivat hangata pumpun mäntiä, pumppuletkuja ja siten vaikuttaa ruiskun suuttimen käyttöikään.

2.4.2 Polymeerikuidut

Muovikuitujen käyttö ruiskubetonin vahvistusmateriaalina on aloitettu laajamittaisesti maailmalla 1990-luvulla. Muovikuitujen tärkeimpänä etuna voidaan pitää niiden ruostumattomuutta. Tällöin rakenteen kantokyky ei ole niin haavoittuvainen ympäristön asettamille haasteille. Wimpennyn ym. [2013] mukaan muovikuitujen yleisin valmistusmateriaali on polyolefiini, joka on sekoitus polyeteeniä ja polypropeenä. Polyeteenin ja polypropeenin lisäksi muovikuituja valmistetaan myös seuraavista muoveista tai niiden yhdistelmistä: polyesteri, polyakryyli, polyamidi, polyvinylialkoholi ja nailon. Zhihongin ja Feldmanin [1995] mukaan muovikuidut valmistetaan siten, että niiden rakennusosat suuntautuvat suotuisasti sen kuormankantokyvyn kannalta. Tämä saadaan aikaan vetämällä kuitu valmistusprosessin yhteydessä moninkertaiseksi sen alkuperäiseen pituuteen nähden. Salon [2010] mukaan polymeerikuituja voidaan myös valmistaa leikkamalla tai ruiskupuristamalla polymeerimassasta. Muovikuitujen ollessa huomattavasti kevyempiä kuin teräskuidut, on niitä helpompi käsitellä. Keveydellä on myös haittapuoli: kuidut erottuvat massassa betonin kyydissä, jolloin massa ei välttämättä ole yhtä tasalaatuista ruiskutushetkellä kuin teräskuitumassa. Ongelma ratkaistaan kuitenkin pidemmällä sekoitusajalla ja käyttämällä betonautoja, joissa on pyörivät säiliöt. Polymeerikuitujen ollessa pehmeämpiä kuin teräskuidut, ne eivät mekaanisesti kuluta ruiskutuskalustoa samalla tavalla.

Polymeerikuitujen käytöllä mahdollistetaan pitkäikäisten rakenteiden valmistaminen. Synteettinen rakennekuitu on kestävä ratkaisu, kun rakenteelle oletettavat muodonmuutokset ovat suuria. Kuitujen materiaalin ollessa vapaa korroosiolle, sen vahvistavat ominaisuudet eivät katoa rakenteesta korroosion seurauksena. Teoriassa polymeerikuiduilla vahvistetun ruiskubetonin pumpattavuusominaisuuksien tulisi olla hieman paremmat kuin vastaavan teräskuiduilla vahvistetun massan. Eri projekteista saatujen käytännönkokemusten mukaan tämä ei kuitenkaan pidä täysin paikkaansa.

Polymeerikuitujen ainesosana käytetyn polymeerin tiheys on vettä pienempi. Tästä huolimatta siitä ei ole haittaa kuitujen sekoittamisessa massaan. Kuituja sekoitettaessa liian kauan Lambrechtsin [2005] mukaan saattaa osa kuiduista rispaantua ja täten on vaarana pilata kuidut. Tällaista ongelmaa ei ole havaittu teräskuituja käytettäessä.

Polymeerikuitu käyttäytyy kuormitustilanteessa erilaisilla kuin teräs. Teräskuidun vetolujuuden ollessa suuri, se harvoin katkeaa kuormituksesta. Salon [2014] mukaan kuormi-

tustilanteessa teräskuitu useasti repeää pehmeämmästä materiaalista, joka tässä tapauksessa on betoni. Polymeerikuiduilla haetaan vastaavanlaisia ominaisuuksia, vaikkakin rakenteen toiminta on hyvin erilainen ensimmäisen halkeaman jälkeen. Polymeerikuiduilla on sama vetolujuus mutta eri kimmokerroin ja muotoilu kuin teräskuiduilla. Ruiskubetonirakenteessa esiintyvät halkeamat ovat vaarallisia teräskuiduilla vahvistetun rakenteen osalta, mutta polymeerikuitujen ominaisuuksien toimesta rakenteen käyttöä voidaan jatkaa ja suorittaa tarvittavat korjaukset.

3 Kalliota vahvistavan ruiskubetonin laadunvarmistusmenetelmät

3.1 Laadunvarmistuksen perusteet

Kalliota vahvistava ruiskubetonirakenne suunnitellaan täyttämään sille esitetyt laatuvaatimukset. Nämä vaatimukset täyttääkseen ruiskubetonia testataan pääsääntöisesti kolmessa eri vaiheessa. Nämä koevaiheet ovat: ennakkokokeet, työnaikaiset kokeet ja valmiin ruiskubetonirakenteen kokeet. Tehdyistä kokeista laaditaan testiraportti. Ruiskubetonin laatua valvotaan rakentamisen aikana, jotta rakentamisesta syntyvä lopputuote vastaa suunniteltuja laatuvaatimuksia. Kokeilla haetaan laatupoikkeamia, jotka voivat vaikuttaa rakentamisen laatuun. Mikäli laatupoikkeamat havaitaan ja korjataan ajoissa, on rakenteella mahdollisuus saavuttaa sille asetetut tavoitteet. Näiden kokeiden tarkoituksena on erityisesti varmistaa vastuuntuntoisen rakentamisen toteutumista. Kun työmailta vaaditaan joko standardien tai työselostuksien kautta nämä asiakirjat, voidaan rakentamisen laatua säädellä tarkemmin.

Ruiskubetonin kokeet on määritelty standardissa SFS-EN 14487-1. Kalliolujitukseen käytettävän ruiskubetonin SFS-EN 14487-1 mukainen tarkastuskategoria on 3 (maaperän vahvistaminen). Ruiskubetonoinnissa käytettävän annostelulaitteiston SFS-EN 14487-2 taulukon 1 mukainen tarkastusluokka on 3. Työn toteuttamisen tarkastuksen laajuudelle SFS-EN 14487-2 taulukon 2 mukainen tarkastusluokka on 3.

Taulukko 2. Ruiskubetonin ominaisuuksien valvonta [SFS-EN 14487-1]

Testin tyyppi	Tarkastus/ testaus minkä mukaisesti	Miniminäytteenottotajaus									
		Maaperän vahvistaminen			Korjaus ja parantaminen			Ilsenäiset kantavat rakenteet			
		Kategoria 1	Kategoria 2	Kategoria 3	Kategoria 1	Kategoria 2	Kategoria 3	Kategoria 1	Kategoria 2	Kategoria 3	
Tuoreen betonin valvonta											
1	Tuoreen betonin vesisementtisuuhde, kun käytetään märkäseosmenetelmää	Laskemalla tai testimenetelmän mukaisesti			Päivittäin			Päivittäin		Päivittäin	
2	Kiihdytin	Lisätyn määrän tallenne			Päivittäin			Päivittäin		Päivittäin	
3	Tuoreen betonin kuitupitoisuus	prEN 14488-7	vähintään 1	1/200 m ³ tai 1/1 000 m ²	1/100 m ³ tai 1/500 m ²	vähintään 1	1/500 m ² vähintään 2	1/250 m ³ tai vähintään 3	1/200 m ³ tai 1/1 000 m ² vähintään 1	1/100 m ³ tai 1/500 m ² vähintään 2	1/50 m ³ tai 1/250 m ² tai vähintään 3
Kovettuneen betonin valvonta											
4	Nuoren ruiskubetonin lujuustesti	prEN 14488-2	1/5 000 m ² tai 1/2 kuu-kaudessa	1/2 500 m ² tai 1/kuukausi	1/250 m ² tai 2/kuukausi			prEN			
5	Puristuslujuus	EN 12504-1	1/1 000 m ³ tai 1/5 000 m ²	1/500 m ³ tai 1/2 500 m ²	1/250 m ³ tai 1/1 250 m ²	1/500 m ³ tai 1/2500 m ² tai vähintään 1	1/100 m ³ tai 1/500 m ² tai vähintään 2	1/50 m ³ tai 1/250 m ² tai vähintään 3	1/500 m ³ tai 1/2 500 m ² tai vähintään 1	1/100 m ³ tai 1/500 m ² tai vähintään 2	1/50 m ³ tai 1/250 m ² tai vähintään 3
6	Kovettuneen betonin tiheys	EN 12390-7	Kun testataan puristuslujuus			Kun testataan puristuslujuus			Kun testataan puristuslujuus		
7	Vesitiivisyys	EN 12390-8				1/1 000 m ² tai vähintään 1	1/500 m ² tai vähintään 2	1/250 m ² tai vähintään 3	1/1000 m ² tai vähintään 1	1/500 m ² tai vähintään 2	1/250 m ² tai vähintään 3
8	Jäädytys/sulatuskestävyys	Ks. alaviite d				1/1 000 m ² tai vähintään 1	1/500 m ² tai vähintään 2	1/250 m ² tai vähintään 3	1/1 000 m ² tai vähintään 1	1/500 m ² tai vähintään 2	1/250 m ² tai vähintään 3
9	Tartuntalujuus	EN 14488-4 ^a EN 1542 ^b		1/2 500 m ²	1/1 250 m ²	1/1 000 m ² tai vähintään 1	1/500 m ² tai vähintään 2	1/250 m ² tai vähintään 3			
Kuituvahvistetun ruiskubetonin valvonta											
10	Kovettuneen betonin kuitupitoisuus ^c	prEN 14488-7	Kun testataan jäännöslujuus tai energianabsorptiokapasiteetti			Kun testataan jäännöslujuus			Kun testataan jäännöslujuus		
11	Jäännöslujuus tai energianabsorptiokapasiteetti	prEN 14488-3 tai prEN 14488-5	1/2 000 m ³ tai 1/10 000 m ²	1/400 m ³ tai 1/2 000 m ²	1/100 m ³ tai 1/500 m ²	vähintään 1	1/2 000 m ² tai vähintään 2	1/500 m ² tai vähintään 3		1/2 000 m ² tai vähintään 2	1/500 m ² tai vähintään 3
12	Taivutusmurtolujuus	prEN 14488-3	Kun testataan jäännöslujuus			Kun testataan jäännöslujuus			Kun testataan jäännöslujuus		
13	Ensimmäinen lujuushuippu	prEN 14488-3	Kun testataan jäännöslujuus			Kun testataan jäännöslujuus			Kun testataan jäännöslujuus		

^a Maaperän vahvistaminen
^b Korjaus
^c Tämä testi on vaihtoehtoinen rivillä 3 mainitulle, kun ei ole käytännöllistä määrittää kuitupitoisuutta tuoreesta ruiskubetonista¹⁾
^d Koska eurooppalaista standardia ei ole tämän asiakirjan julkaisemisajankohtana, sovelletaan kansallisia standardeja

3.2 Laadunvarmistuskokeet eri vaiheissa

Ennakkokokeilla halutaan varmistua massan ominaisuuksista ennen rakenteen rakentamisen aloittamista. Mikäli ennakkokokeiden aikana havaitaan laatupoikkeamia, voidaan niihin vielä vaikuttaa ja korjata massa määritysten mukaiseksi, jolloin vahinkoa ei pääse tapahtumaan rakentamisen aikana. Hollménin [2014] mukaan ennakkokokeilla halutaan yleensä selvittää ruiskubetonimassan notkeus, tiheys, kuitupitoisuus, energianabsorptiokapasiteetti eli sitkeys, puristuslujuus, vesitiivisyys ja tarvittaessa jäädytys-sulatuskestävyys.

Jokaisesta eri suhteutuksella ja kuitutyyppillä tehdystä betonimassasta tulee työmaalla tehdä ennakkokokeet, joissa käytettävän ruiskubetonin tulee vastata suhteutuksen ja kiihdytinaineiden osalta työssä käytettävää betonia. Kokeet on tehtävä riittävällä ruiskubetonin määrällä, jotta saavutetaan tasainen virtaus. Ennakkokokeet tehdään myös työnaikaisille ruiskubetonimassoille. Ennakkokokeet tulee standardin SFS-EN 14487-1 mukaisesti uusia, jos jokin betonin osa-aine, kuitutyyppi, henkilökunta tai ruiskutuska-lusto vaihtuu työn aikana.

Työn aikaiset kokeet ovat jatkoa ennakkokokeille, jolloin pidetään huolta, että rakentamiseen käytettävä massa vastaa ennakkokokeilla määritettyä ja täyttää edelleen laatuvaatimukset. Mikäli tässä vaiheessa vielä havaitaan laatupoikkeamia, voidaan massan koostumusta korjata. Ruiskubetonimassalle toteutetaan työmaalla standardin SFS-EN 14487-1 taulukoiden 6 ja 7 mukaiset kokeet. Näytteitä otetaan kolmen (3) näytteen sarjana jokaista alkavaa 100 rb m³:a kohden. Betoninäytteet otetaan betonipumpun suppilosta/siilosta. Näytteet on syytä määrittää otettavan, kun kuormasta on purettu 0,3 m³ (näyte 1), kuorman keskivaiheella (näyte 2) ja kun kuormasta on jäljellä 0,5 m³ (näyte 3). Ruiskutustyön aikana massasta määritelty kuitumäärä tulee vastata ruiskubetonimassalle asetettuja vaatimuksia.

SFS-EN 14487-1:n taulukon 12 mukaisesti kovettuneesta ruiskubetonista mitataan puristuslujuus, tiheys, vesitiiviys ja tarvittaessa jäädytys/sulatuskestävyys työn aikana. Määritelty mittaustiheys on riippuvainen ruiskutusmäärästä. Kokeet tehdään ruiskuttamalla EFNARC-koelaatat ja tekemällä kokeet niistä. Nämä kovettuneen betonin kokeet tulee suunnitelma-asiakirjoissa määrittellä tehtäväksi ruiskutustyön aikana mutta ne kannattaa tehdä heti urakan alettua, jotta mahdollisiin laatupoikkeamiin ehditään reagoimaan työn edetessä.

Lopullisen rakenteen kokeet ovat pääasiassa samoja kun työnaikaiset kokeet. Näillä halutaan varmistaa, että valmistunut rakenne täyttää sille annetut vaatimukset ennen käyttöön ottamista.

Työnaikaisten kokeiden lisäksi halutaan varmistua rakennepaksuudesta poraamalla reikä ruiskubetonikerroksen läpi taustamateriaaliin eli kallioon ja mittaamalla betonikuoren paksuus. Puristuslujuus, tiheys ja kuitupitoisuus voidaan määrittää kairaamalla rakennekoekappaleet valmiista rakenteesta ja koestamalla ne edellä mainitun standardin SFS-EN 14487-1 mukaan.

Taulukossa 3 on jaoteltu, mitä kokeita missäkin vaiheessa hanketta tehdään.

Taulukko 3. Laadunvarmistuskokeet hankkeen aikana

	Kokeet		
	Ennakko	Työnaikainen	Lopullinen rakenne
Notkeus	X	x	
Kuitumäärä	X	x	x
Puristuslujuus	X	x	x
Tiheys	X	x	
Paineellisen veden tunkeuma	X ^(tarvittaessa)		
Energian absorptiokapasiteetti	X	x	x
Pakkasen kestävyys	X ^(tarvittaessa)	x	
RB-koostumuksen vaatimukset	x	x	
Paksuuden mittaus		x	x
Tartunnan varmistaminen			x

3.2.1 Notkeus

Notkeuden määrittämiseen tuoreelle kuituvahvisteiselle ruiskubetonille käytetään painumakartiokoetta. Koe suoritetaan standardin SFS-EN 12350-2 mukaisesti. Painumakartiokoe aloitetaan asettamalla standardin mukainen kartio tiiviisti maassa olevaan metallilevyyn. Tämän jälkeen kartio täytetään tuoreella ruiskubetonimassalla noin 1/3 sen tilavuudesta ja massa tiivistetään painumasauvalla. Tämä toimenpide toistetaan vielä kaksi kertaa kartion täyttämiseksi. Lopuksi kun kartio on täytetty, sen kartion pinta tasoitetaan. Tämän jälkeen kartio nostetaan tasaisella vauhdilla ylös ja massa kartion sisältä leviää koealustalle. Kun ruiskubetonimassa on lopettanut painumisen, sen korkein kohta mitataan alkuperäiseen kartion korkeuteen asettamalla kartio levinneen massan viereen ja mittaamalla huippujen välinen etäisyys. Tavoitetulos ruiskubetonin painumalle on 150 mm...200 mm (joka vastaa notkeusluokkaa S3...S4). Tämä tavoite johtuu työstettävyydestä.

Taulukko 4. Ruiskubetonin notkeus- ja painumaluokat [By50/2012 ja SFS-EN 206-1]

Notkeusluokka	Kuvaus:	Painuma
Nestemäinen S4	Helposti leviävä ja tiivistyvä betonimassa.	160 - 210 mm
Vetelä S3	Hyvä valettavuus ja tiivistettävyyys (pienet ja tiheästi raudoitetut rakenteet).	100 - 150 mm
Notkea S2	Hyvä koossapysyvyys. Leviää hitaasti ja vaatii tiivistykseen tärytystä.	50 - 90 mm
Jäykkä S1	Jäykkä betonimassa. Vaikea tiivistää sauva-tärytyksellä. Betonipinnan hierto koneellisesti.	10 - 40 mm

3.2.2 Kuitumäärä

Teräskuituvahvisteisen ruiskubetonin kuitupitoisuus voidaan selvittää tuoreesta tai kovettuneesta ruiskubetonista standardin SFS-EN 14488-7 mukaan. Polymeerivahvisteisesta ruiskubetonista ei kuitupitoisuutta voi mitata kuin tuoreesta, kovettumattomasta ruiskubetonista. Polymeerikuitujen määrän kartoittamiseen ei ole vielä standardipohjaista koetta, mutta ne voidaan mitata tuoreesta massasta samalla menetelmällä kuin teräskuituja mitattaessa. Perusmassasta otetaan kolme (3) 1-2 kg:n tuoretta näytettä joko kaapimalla ruiskutetusta pinnasta. Kovettuneesta ruiskubetonista otetaan kolme (3) näytettä leikkaamalla rakenteesta pituudeltaan 75 mm-100 mm ja halkaisijaltaan 50 mm-100 mm kokoiset palat. Koekappale murskataan siten, että kuidut voidaan kerätä punnittavaksi. Teräskuiduilla kuitumäärän mittaus voidaan myös suorittaa koestetusta laattakoe näytteestä murskaamalla se ja erottelemalla kuidut magneetilla.

Kuitujen erottumisen takia (erityisesti polymeerikuiduilla) kuidut eivät välttämättä sijaitse tasaisesti kuormassa. Myös hukkaroiskeen takia näytteiden kuitupitoisuus rakenteessa voi vaihdella. Näytteiden tilavuus määritetään kuitupitoisuuden laskentaa varten vedensyrjäytysmenetelmällä tai laskemalla kappaleen mitoista. Kuidut erotetaan betonista joko murskaamalla kuiva näyte tai huuhtomalla tuore näyte siivilän läpi. Kun kuidut ovat erotettu muusta massasta, punnitaan teräskuidut vaa'alla 0,1 gramman tarkkuudella ja polymeerikuidut 0,01 gramman tarkkuudella. Polymeerikuidut on kuivattava ennen punnitusta, jotta vesi, sementtijäämät ja muu lika ei pääse vaikuttamaan tulokseen. Vastaavasti teräskuiduista on poistettava sementtijäämät ja muu lika. Polymeerikuitujen tapauksessa muu aines kuin itse polymeerikuidut vaikuttavat tulokseen herkemmin kuin teräskuituihin. Koska polymeerikuituja on ruiskubetonimassassa vain 3 –

10 kg/m³, on virheistä (ylimääräinen materiaali kuitujen seassa) aiheutuva tuloksen muutos suurempaa kuin teräskuitujen kohdalla, joita on ruiskubetonimassassa 45 – 60 kg/m³. Polymeerikuidut ovat itsessään niin kevyitä, että mittaustulos antaa liian optimistisen kuvan kuitujen määrästä massassa, jos siinä on muuta materiaa. Kuitupitoisuus lasketaan kaavalla 1. Koetuloksista lasketaan keskihajonta ja keskiarvo. Näin saadaan kuitupitoisuus näyte-erälle.

$$C_f = \frac{m_f \times 1000}{V_d}, \quad (1)$$

jossa C_f on kuitupitoisuus (kg/m³), m_f on näytteestä erotettu kuitujen massa (g) ja V_d on näytteen tilavuus (m³).

Standardin SFS-EN 14487-1 mukaan vaatimustenmukaisuus saavutetaan, jos tuoreen betonin mitatun kuitupitoisuuden keskiarvo on vähintään kuudesta (6) näytteestä vähintään yhtä suuri kuin $V_f - 10\%$ painosta. Kovettuneen betonin teräskuitujen pitoisuus täyttää vaatimukset, jos mitatun kuitupitoisuuden keskiarvo on vähintään kuudesta (6) näytteestä yhtä suuri kuin $V_f - 15\%$ painosta. V_f on ennen rakentamista tehtyjen testi-
en perusteella määritelty tavoitearvo.

3.2.3 Puristuslujuus

Puristuslujuus testataan standardin SFS-EN 12390-3 mukaan ja tavoitteena on betonin vaadittu lujuus. Koekappaleet kuormitetaan murtoon puristustestauskoneella, joka täyttää standardin EN 12390-4 vaatimukset. Koekappaleiden tulee olla kuutioita, lieriötä tai porattuja rakennekoekappaleita, jotka täyttävät standardien EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12390-2 tai EN 12504-1 vaatimukset.

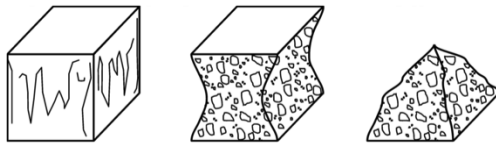
Koekappale asetetaan koneeseen siten, että kuorma kohdistetaan kohtisuoraan valusuuntaa vasten. Valitaan tasainen kuormituksen kasvunopeus väliltä $0,6 \pm 0,2$ MPa/s ((N/mm²)/s). Alkukuormituksen, joka on korkeintaan noin 30 % murtokuormasta, päätyttyä kohdistetaan kuormitus koekappaleeseen ilman iskua, ja tasaisesti lisäten valitulla vakionopeudella $\pm 10\%$, kunnes kuormaa ei voida enää lisätä. Koekappaleen kestävä suurin voima merkitään muistiin ja betonin puristuslujuus lasketaan kaavalla 2.

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (2)$$

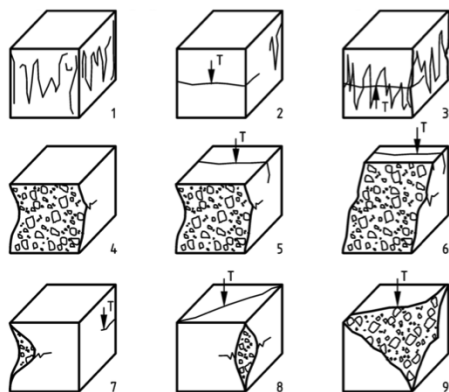
jossa f_c on puristuslujuus MPa (N/mm²), F on suurin kuorma murtohetkellä (N) ja A_c on kuormituksen alaisen koekappaleen poikkileikkauspinta-ala (mm²).

Esimerkkejä testausten hyväksyttävästä suorituksesta osoittavista koekappaleiden murtotavoista ilmenee kuutioiden osalta kuvasta 6 ja lieriöiden osalta kuvasta 8. Esimerkkejä epätydyttävistä murtotavoista kuutioille ilmenee kuvasta 7 ja kuvasta 9 lieriöille. Kuvassa 7 esiintyvä kirjain T on vetojännityksestä aiheutuva halkeama.

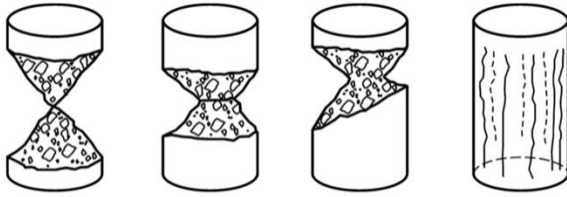
Mikäli murtotapa ei ole hyväksyttävä, kirjataan tämä muistiin viitaten kuvan 7 tai 9 murtotapatyyppiin, joka lähinnä muistuttaa testauksessa havaittua murtotapaa. Epätydyttävät murtotavat johtuvat ruiskubetonimassan ainesosien epäonnistuneesta suhteutuksesta tai epäonnistuneesta valusta. Testaajalle se kertoo voimien jakautuvan epätasaisesti koekappaleen sisällä ja betonimassan olevan heterogeenistä.



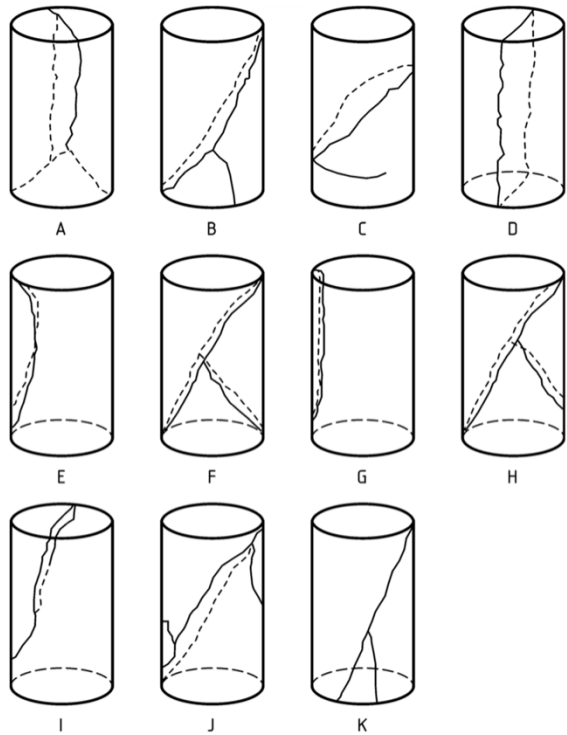
Kuva 6. Hyväksyttäviä murtotapoja kuutiomaisille koekappaleille [SFS-EN 12390-3]



Kuva 7. Joitakin epätydyttäviä murtotapoja kuutiomaisille koekappaleille [SFS-EN 12390-3]



Kuva 8. Hyväksytyjä murtotapoja lieriömäisille koekappaleille [SFS-EN 12390-3]



Kuva 9. Joitakin epätydyttäviä murtotapoja lieriömäisille koekappaleille [SFS-EN 12390-3]

Ruiskubetonin puristuslujuus arvostellaan yleensä 28 vuorokauden iässä, vaikkakin lujuuden kehitys jatkuu vielä sen jälkeen. Betoni jaetaan lujuutensa perusteella puristusluokkiin, joka ilmaistaan merkinnällä C25/30. Se tarkoittaa, että 150 mm x 150 mm x 150 mm kokoisen kuution muotoisen koekappaleen avulla määritetty betonin pienin ominaispuristuslujuus on 30 MPa. Vanha tapa merkitä ominaispuristuslujuutta oli tässä esimerkissä K30. C25 kertoo ominaispuristuslujuuden lieriön mallisen koekappaleen avulla määritettynä. Standardikokoiset koekappaleet esitetään kuvassa 10.



Kuva 10. Koekappaleet vedessä odottamassa koestusta [Kuva: Pihlström 2013]

3.2.4 Tiheys

Tiheys mitataan standardin SFS-EN 12390-7 mukaan. Tuoreen ruiskubetonin tiheys voidaan määrittää täyttämällä tiiviisti tilavuudeltaan ja painoltaan tunnettu vähintään 5 litran vetoinen astia pintaan saakka. Käytettävän astian pienin sisämitta on oltava vähintään 150 mm. Astiaa täytettäessä massa tiivistetään sullontasauvalla tai täryttimellä. Liiallista tiivistystä on vältettävä, jotta huokostusilma ei poistu massasta. Täytetty astia punnitaan 10 gramman tarkkuudella. Tuoreen ruiskubetonin tiheys määritetään kaavalla 3.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (3)$$

jossa D on tuoreen massan tiheys (kg/m^3) tarkkuudella, m_1 on tyhjän astian massa (kg), m_2 on tiivistetyllä betonilla täytetyn astian massa (kg) ja V on käytetyn tyhjän astian tilavuus (m^3).

Tiheyden määrittäminen kovettuneelle betonille riippuu sen kosteustilasta, joka voi olla normaali, uunikuivattu tai veden kyllästämä. Tiheyttä määritettäessä kappaleen muodolla ei ole niin suurta merkitystä mutta sen tilavuuden tulee olla vähintään 0,785 litraa. Kappaleen tiheys voidaan määrittää vesipunnituksella tai laskennallisesti kaavalla 4.

$$D = \frac{m}{V}, \quad (4)$$

jossa m on kappaleen massa (kg) ja V on kappaleen tilavuus (m^3). Käytännössä kovettuneen betonin tiheys määritetään koekappaleelle puristuskoetta varten.

3.2.5 Paineellisen veden tunkeumasyyvyys

Veden tunkeumasyyvyys määritetään standardin SFS-EN 12390-8 mukaan vähintään 28 vuorokauden ikäiselle kovettuneelle koekappaleelle kohdistamalla $500 \text{ kPa} \pm 50 \text{ kPa}$ suuruinen veden paine koekappaleen pintaan $72 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$ ajan.

Koekappaleen muoto voi olla lieriö, kuutio tai prisma ja testattavan pinnan vähimmäismittan tulee olla 150 mm ja muiden mittojen on oltava vähintään 100 mm. Tämän jälkeen koekappale halkaistaan ja veden tunkeumasyyvyys mitataan millimetrin tarkkuudella. Standardin SFS-EN 14487-1 mukaan vaatimustenmukaisuus saavutetaan, jos vähintään kolmen (3) kappaleen näyte-erän keskiarvo täyttää määritellyn raja-arvon. Ruiskubetonin veden tunkeuma tässä kokeessa tulee olla enintään 50 mm.

3.2.6 Energian absorptiokapasiteetti

Energian absorptiokapasiteetti mitataan EFNARC-laattakokeella standardin SFS-EN 14488-5 mukaisesti. Energian absorptiokapasiteetti ilmoittaa lukuarvona keskipisteestä kuormitetun neliön muotoisen laatan taivutuksessa absorboiman energian määrän jouleissa (J). Se ottaa huomioon rakenteessa olevien kuitujen mahdollisen suuntautumisen laatan tason suuntaisesti. EFNARC-laattakoe suoritetaan normaalisti testilaattojen ollessa 28 päivän iässä. Työselosteessa useasti määrätään ruiskutettavien koekappaleiden määrä per ruiskutettu rakenne m^3 . Standardin SFS-EN 14487-1 taulukon 2 mukainen EFNARC-laattakokeiden määrä ($1/500\text{m}^2$) on suomalaisissa tunnelihankkeissa varsin korkea. Onkin yleistä rajoittaa tarvittavien laattojen määriä, esimerkiksi Länsimetron louhintaurakoissa oli käytössä ”neljän onnistuneen laatan sarja”. Sama on käytössä myös monessa muussa hankkeessa.

Näytteiden oton osalta koejärjestelyt suoritetaan standardin SFS-EN 14488-1 mukaisesti, jossa määrätään käsin ruiskutettavan testilaatan mitoiksi vähintään 500 mm x 500 mm ja ruiskutusrobotia käytettäessä vastaavat mitat ovat 1000 mm x 1000 mm.

Ruiskutetun koekappaleen paksuus 100 ± 5 mm varmistetaan välittömästi ruiskutuksen jälkeen tasaamalla koekappaleen pinta. Muotti on muotoiltava siten, ettei hukkaroiske keräänny sen sisäpuolelle. Testilaatan reunasta sahataan pois ylimääräinen hukkaroiske ennen koekappaleen koestamista. Käytetyn muotin reuna on oltava viistetty yhtä leveältä matkalta kuin muotti on syvä.

Muotti ruiskutetaan samalla ruiskuttajalla, kalustolla, menetelmällä ja mitoilla kuin suunniteltu rakenne. Näin koetulokset vastaavat mahdollisimman tarkasti rakenteen ominaisuuksista. Muotin ruiskutus suoritetaan suorassa kulmassa muottia vasten. On tavanomaista laittaa muotit nojaamaan ruiskutettavaa rakennetta vasten ja ruiskuttaa muotit muun rakenteen kanssa, kuten kuvassa 11 on esitetty.

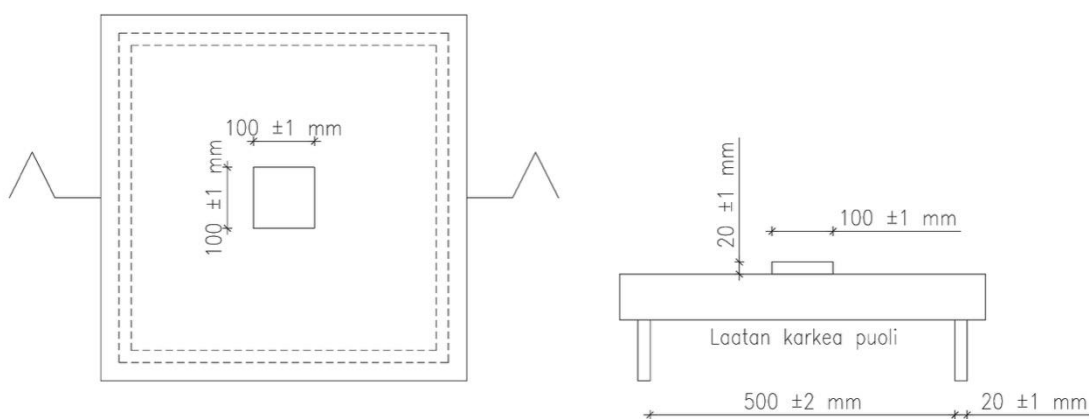


Kuva 11. Ruiskubetonikoelaatan valmistus [Guirguis 2013]

Ruiskutuksen jälkeen testilaattojen jälkihoito hoidetaan niin kuin muunkin rakenteen. Testilaattojen päälle laitetaan aina vähintään muovi suojaamaan kosteuden haihtumista ja useasti myös kasteltu eristematto parantamaan kosteuden säilymistä. Tämä tehdään, koska tunnelissa useasti vallitseva tuulen vire kiihdyttää kosteuden haihtumista. Koekappaleet myös numeroidaan maalaamalla koekappalenumero laatan pintaan ja merkitään työmaan kirjan pitoon. Jälkihoitoa jatketaan vähintään seitsemän vuorokautta kastelemalla eristevillaa tai laatan pintaa tai kunnes muotti puretaan. Testilaattaa saa siirtää aikaisintaan 18 tunnin kuluttua ruiskutuksesta. Muotti puretaan yleensä työmaalla ja testilaatat valmistellaan kuljetusta varten nostamalla ne kuormalavojen päälle. Testilaattoja käsitellessä ja kuljettaessa on ne suojattava mahdollisilta mekaanisilta vaurioilta ja kosteushäviöltä, sillä ne vaikuttavat oleellisesti koetuloksiin. Kuten palkkikokeessa, koekappaleita säilytetään vedessä kolme (3) päivää ennen koestamista ja nostetaan vedestä suoraan kokeeseen.

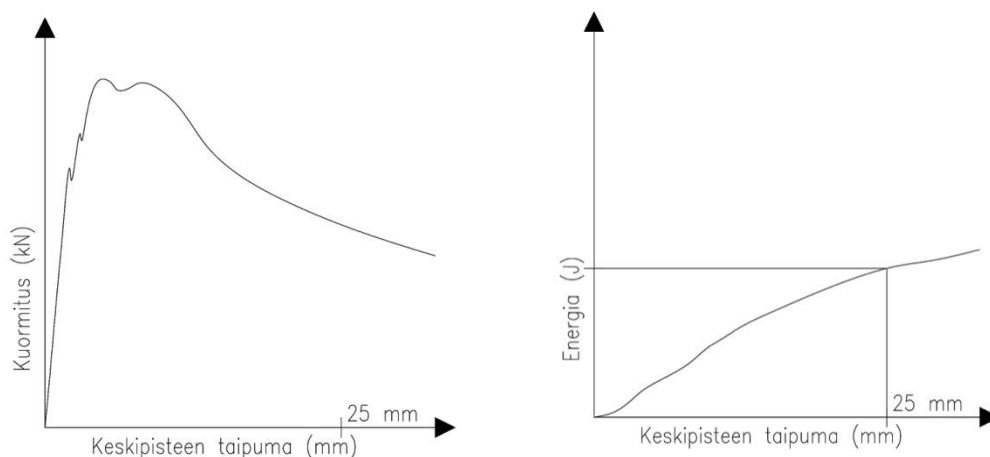
Yllä selitetyt järjestelyt koskevat testilaattojen ruiskuttamista. Muiden, kuin EFNARC-laattakokeen tapauksessa varsinaiset koekappaleet sahataan tai kairataan tästä ruiskutetusta testilaatasta. Koekappaleet otetaan vähintään 125 mm päästä testilaatan reunoista, pois lukien palkki- ja laattakokeissa käytettävät näytteet, jotka ovat kooltaan koko testilaatan kokoisia.

EFNARC-laattakokeessa reunoiltaan tuettu laatta kuormitetaan keskeltä kunnes 30 mm taipuma saavutetaan. Kokeessa laatan muotin vastainen pinta on ylöspäin ja tasattu karkea pinta osoittaa alaspäin. Laatan kuormitus tapahtuu 1,5 mm/min. Koejärjestelyt suoritetaan kuvan 12 mukaan.



Kuva 12. EFNARC-laattakokeen koejärjestely [Kuva: Pihlström 2014]

EFNARC-laattakokeista saaduista tuloksista koostetaan kaksi kuvaajaa, joissa esitetään koelaatan kuorma (kN) suhteessa taipumaan (mm) ja energia-absorptio (J) suhteessa taipumaan (mm) katso kuva 13. Kokonaisenergia laatan kuormituksessa määritetään keskipisteen taipuman ollessa 25 mm absorptioenergian kuvaajassa. Tällä tavalla eri laatoista mitatuista tuloksista saadaan vertailukelpoisia keskenään. Yksi tärkeä tieto saadaan myös EFNARC-laattakokeesta, joka ei selviä kuvaajasta, on murtokuvio. Murtokuvio, joka tarkastellaan silmämääräisesti, kertoo, kuinka voimat jakaantuvat keskenään laatussa. Mitä useampaan osaan laatta halkeaa sen murtuessa, sen paremmin voimat jakaantuvat laatussa sisäisesti. Kuvassa 14 näkyy murtokuvio.



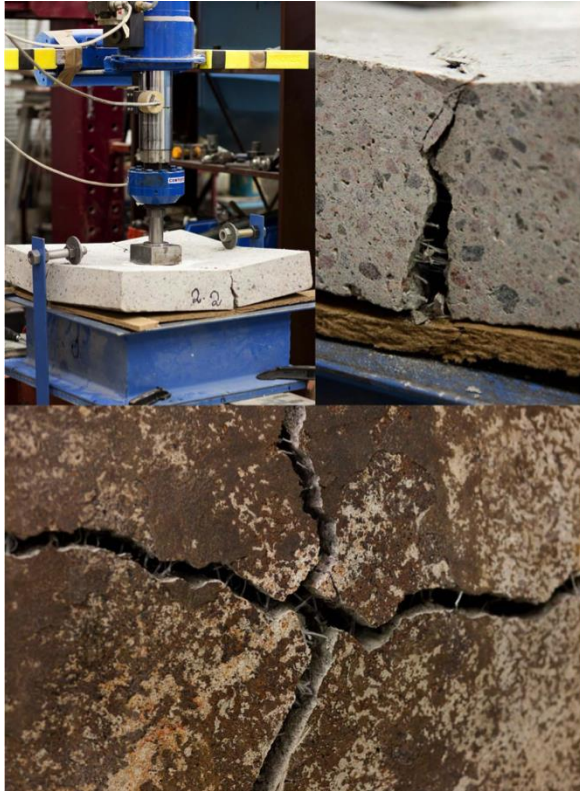
Kuva 13. Kuormitus muodonmuutoskäyrä ja absorboituneen energian määrittäminen [Salo 2010]

Todellista sitkeyttä määritettäessä, varsinkin kuituvahvisteisessa ruiskubetonissa, laattakoe antaa paremman kuvan kuin jäännöslujuusluokitus. Palkkikoe tuottaa koekappaleeseen jännityksiä yhdessä suunnassa, jolloin kuidut, jotka poikkeavat jännityssuunnasta, eivät ota kuormia vastaan. Laattakoe kuormittaa koekappaleita monesta suunnasta jolloin laatta joutuu kantamaan kuormia ristiin. Laattakoe huomio toisin sanoen suuremman osan laattassa olevista kuiduista. Laattakoe sopii hyvin eri vahvistusmenetelmien vertailuun.

Laattakokeen aiheuttama kuormitus vastaa paremmin todellisessa rakenteessa syntyvää kuormaa kuin palkkikoe. Laattakokeen voidaan ajatella vastaavan kuormitustilannetta kalliokatossa, jossa pultitus ja ruiskubetoni toimivat yhdessä. Laatan keskipisteesseen kohdistuvaa voimaa voidaan ajatella kalliopultin kiinni pitävänä voimana ruiskubetonille ja koelaitteen reunojen, joiden päällä laatta lepää, simuloivan kalliosta syntyvää kuormitusta. Laattakoe käy hyvin eri vahvistusmenetelmien vertailuun. Taivutuskoeksessa absorboitunutta energiaa vastaavat sitkeysluokat on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Vaatimukset laattakokeen energianabsorptiolle sitkeysluokittain standardin SFS-EN 14487-1 mukaisesti

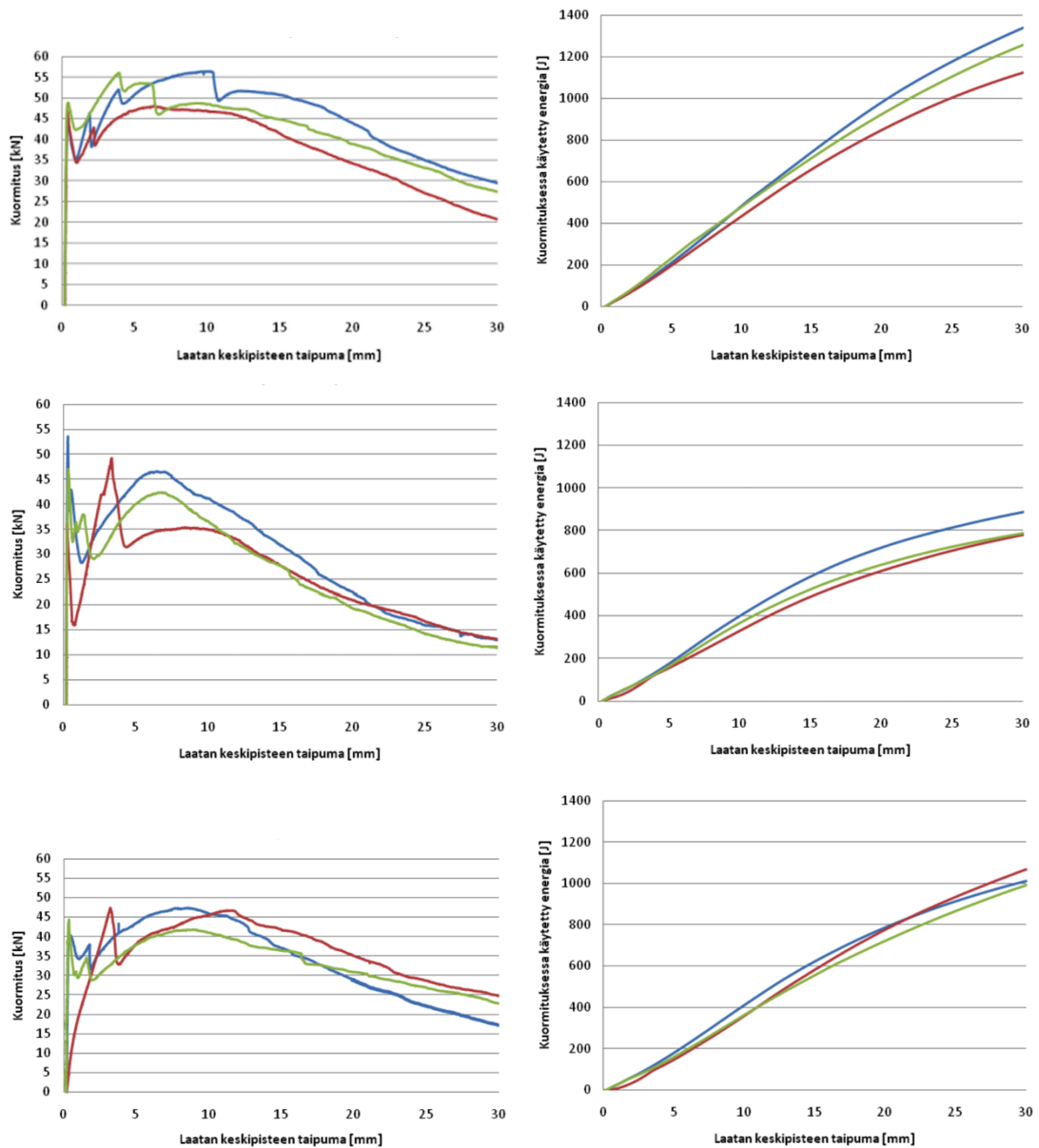
Sitkeysluokitus	Taivutusenergia (J) 25 mm taipumalla
E500	500
E700	700
E1000	1000



Kuva 14. EFNARC-laattakoe [Salo 2010]

Testejä tehtäessä eri kuitutyypeillä vahvistetuille laatoille on tulosten vertailu kuvaajista helppoa. Valittaessa parhaiten suoriutuvaa laattaa, voidaan kuvaajista vertailla eri kuitutyypin välisiä eroja mm. seuraavilta osilta: kuorman kesto, energian absorptio ja saman kuidun tuloksien hajonta. Kokeita tehtäessä kolme (3) kappaletta per kuitutyyppi, on hyvä merkki jos tulokset ovat tasaisia. Tämä tuo varmuutta siihen, että rakenne käyttäytyy todella kuvaajien osoittamalla tavalla todellisessa rakennuskohteessa.

Havainnollistamisen vuoksi kuvassa 15 on esitetty kolmella eri polymeerikuidulla vahvistetun laatan EFNARC-laattakokeiden tulokset. Kuvaajista voi havaita selkeitä eroja kuitujen välillä sekä hajontaa kuitukohtaisesti.

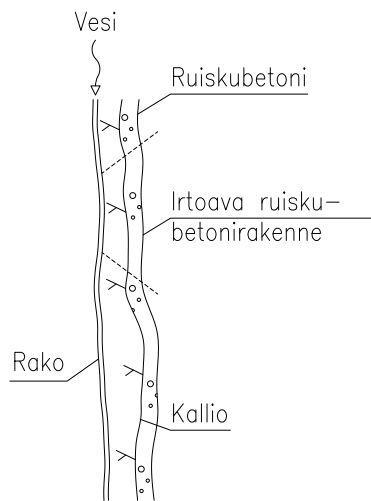


Kuva 15. EFNARC-laattakokeen tuloksia (Kuva erään hankkeen koestusraportista)

3.2.7 Pakkasekestävyys

Betonin pakkasekestävyyttä lisätään usein huokoistimien avulla. Kokon [2014] mukaan ruiskubetoni on materiaalina jo itsessään huokoista, jolloin erillisten huokostimien lisäys massaan on todettu tarpeettomaksi kalliorakentamisessa. Kokon [2014] mukaan tämä on tutkittu hankkeessa E18 Muurla – Salo. Erillisiä pakkasrasituskoekteita harvoin tehdään, vaikka ruiskubetonipinta olisikin pakkaselle alttiina.

Yleisimmin pakkasen aiheuttamat vauriot liittyvät ruiskubetonin ja kallion välissä tai kallion sisällä virtaavan veden jäätymiseen ja laajenemiseen jäätyessään. Kuvassa 16 on havainnollistettu tilanne, jossa kalliossa olevan veden tilavuus kasvaa jäätyessään ja kallion sisällä syntyy painetta. Tämä paine voi Kokon [2014] mukaan vaurioittaa ruiskubetonirakennetta, jolloin seinästä voi irrota pala rakenteesta. Kuvassa 16 esitetty tapaus toimii myös katsastellessa veden jäätymistä kallion ja ruiskubetonin välissä. Tällöin kuitenkin vain ruiskubetonikerros vaurioituu. Tätä estetään tiivistämällä kallio ennakkoon, salaojittamalla kallion vuotokohtat ja mahdollisesti vaativissa kohteissa myös lämpöeristämällä kalliopinta. Paikoin myös ruiskubetonisalaojien saattolämmitys on tarpeen (esim. kuilut).



Kuva 16. Jäätyvän veden vaikutus ruiskubetonirakenteeseen [Kuva: Pihlström 2014]

Mikäli pakkaselle alttiissa kohteessa veden virtaamista rakoön ei pystytä estämään, eikä kalliota lämpöeristämään, menetellään Kokon [2014] mukaan kuvan 17 tavoin. Ruiskubetonin suojaksi veden jäätyessä aiheutuvaa laajenemista vastaan voidaan asentaa teräsverkotus ja ankkuroida se aluslevyllisillä pulteilla kallioon parantaakseen ruiskubetonin sitkeys- ja lujuusominaisuuksia. Erityisesti tunneleiden suuaukon lähetyvillä oleviin, pakkasalttiisiin, salaojiin asennetaan lämpökaapelit, jotka estävät veden jäätyksen salaojiin. Mikäli salaoja täyttyy vedellä ja jäätyy, se rikkoo ruiskubetonipinnan samoin, kun vesi jäätyessään kallioraossa ruiskubetonipinnan takana.



Kuva 17. Ruiskubetonirakenteen suojaus jäätymistä vastaan [Kuva: Pihlström 2014]

Pakkasenkestävyyden toteamiseksi on kuitenkin olemassa erilaisia kokeita jotka on esitetty standardin SFS 7022 liitteessä A.

3.2.8 Ruiskubetonin koostumuksen vaatimukset

Ruiskubetonin koostumuksen vaatimukset ovat esitetty standardissa SFS-EN 14487-1. Betonin suhteutukset tulee valita siten, että täytetään kaikki tuoreen ja kovettuneen betonin toimintakriteerit mukaan lukien: notkeus (märkäseos), tiheys, lujuus, säilyvyys, raudotteiden korroosiosuojaus ja ottaen huomioon ruiskutuksen aikana nykyisen prosessitekniikan sekä hukkaroiskeen ja pölyn määrän.

Ympäristöluokkiin liittyvät betonin koostumuksen ja ominaisuuksien vaatimukset riippuvat ruiskubetonin suunnitellusta käyttöiästä ja ovat standardin EN 206-1 ja SFS 7022 mukaisia.

Betonin koostumuksen arvot viittaavat betoniin ruiskutuksen jälkeen ja ruiskutusprosessissa lisättyjen veden ja kiihdyttävien lisäaineiden vaikutus on otettava huomioon, kuten hukkaroiskeen vaikutuskin.

Suunnitellun käyttöiän aikaansaaminen riippuu standardin SFS-EN 14487-1 mukaan:

- Betonista, joka suunnitellaan ja toteutetaan asianmukaisesti

- Ennakoidusta kunnossapidosta ilman suurehkoja korjauksia

Katselmus ruiskubetonin koostumukselle suoritetaan silmämääräisesti työmaakohteessa.

3.2.9 Paksuuden mittaus

Valmistuneen ruiskubetonirakenteen paksuus voidaan Hollménin [2014] mukaan selvittää poraamalla porakoneella reikä ruiskubetonikerroksen läpi. Poranterän osuminen kallioon havaitaan tunkeutumisenopeuden selvästä muutoksesta. Kun reikä on valmistunut, mitataan reiän syvyys millimetrin tarkkuudella. Tavoitteena rakenteelle on täyttää määrätty rakennepaksuus. Mikäli rakennepaksuudessa havaitaan puutteita, merkitään alueet korjausruiskutusta varten. Reikiä porataan pistokoemaisesti tunnelin holviin ja seiniin tasaisesti sinne tänne.

Hyvänä puolena poraamalla tehtävässä paksuuden määrittämisessä on sen *in situ* menetelmä, eli saadaan todellinen paksuus rakenteessa. Tämä koemenetelmä on myös edullista. Huonona puolena on se, ettei poraus erittele erillisiä ruiskubetonityyppejä tai vaurioita. Tämä tarkoittaa Hollménin [2014] mukaan, että poratessa valmista ruiskubetonirakennetta ei pystytä huomioimaan mahdollisesti vaurioitunutta rakennetta. Esimerkkitapaus on välitön louhinnan keskeyttävä ruiskubetonointi jonka lähellä on räjäytetty ja saattaa siten olla vaurioitunut.

Ruiskubetonin paksuus määrätään mitattavaksi julkaisun alla olevan ruiskubetoniohjeen BY63/2015 mukaan ennen kuiduttoman kerroksen levittämistä, jolloin varmistetaan lujittavan ruiskubetonikerroksen todellisesta paksuudesta. Hyvänä puolena tässä on myös se, että porattu mittausreikä saadaan peitettyä seuraavalla ruiskutuskerroksella.

3.2.10 Rakennekoekappaleet

Rakennekoekappale irrotetaan valmiista ruiskubetonirakenteesta kokeita varten standardin SFS-EN 12390-1 mukaan. Kun koekappale otetaan suoraan ruiskubetonirakenteesta, saadaan tieto rakenteen todellisista ominaisuuksista puristuslujuuden, tiheyden ja kuitupitoisuuden (teräskuiduilla) osalta. Kokeet tehdään edellä olevissa kappaleissa kerrottujen ohjeiden mukaisesti laboratorio-olosuhteissa.

Koekappaleita otetaan tasaisesti sieltä täältä, jolloin pistokoemaisesti on helppo tarkastella isommankin hankkeen ruiskubetonin ominaisuuksia laajalta alueelta. Kuvassa 18 on esitetty rakennekoekappaleen irrotusta ruiskubetonirakenteesta.



Kuva 18. Valmiin ruiskubetonirakenteen rakennekoekappaleiden irrotus [Kuva: Saanio & Riekkola Oy]

3.2.11 Tartunta

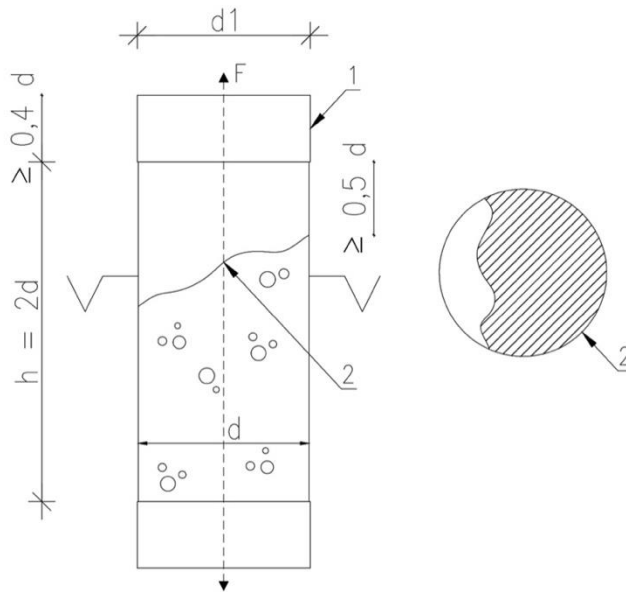
Tartuntalujuus voidaan mitata standardin SFS-EN 14488-4 + A1 mukaan. Hollménin [2015] mukaan työmailla on kuitenkin todettu, että rakennekoekappaleen irrotus harvoin onnistuu tätä koetta varten, joten on tyydytty pelkkään koputuskokeeseen. Laboratoriossa tehtävä tartuntalujuuden mittaus on esitetty alla.

Standardin SFS-EN 14487-1:n mukaan ruiskubetonin tartuntalujuuden vaatimustenmukaisuus saavutetaan, jos vähintään kolmen (3) näytteen erän keskiarvo on vähintään yhtä suuri kuin määritelty arvo. Määritelty arvo esitetään useimmiten työselosteessa.

Tartuntalujuuden testaamista varten rakenteesta kairataan halkaisijaltaan 50 – 100 mm koekappale, jonka pituus on vähintään kaksinkertainen halkaisijaan verrattuna. Koekappale kairataan siten, että se koostuu ruiskubetonista ja taustamateriaalista ja valmistellaan koestusta varten leikkaamalla siten, että materiaalien liitoskohta on koekappaleen keskellä.

Koe suoritetaan liimaamalla koekappaleen molempiin päihin teräslevyt ja vetämällä niitä eri suuntiin kunnes koekappale murtuu. Murtumakohdalle on kaksi vaihtoehtoa. Joko koekappale murtuu materiaalien liitoskohdasta tai toisesta materiaalista. Kuormi-

tusta lisätään nopeudella $0,05 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$ per sekunti. Kuormituslaitteiston tarkkuuden on oltava vähintään $\pm 2 \%$ oletettavasta kuormituksen maksimikuormasta. Koetulos hyväksytään jos vähintään 80% liitosalueen pinta-alasta on murtumisalueella, esitetty kuvassa 19. Kuvassa 19 esiintyvä nro. 1 tarkoittaa koestuslaitteiston kiinnityspinta ja nro. 2 materiaalien välistä liitospintaa. Mikäli murto tapahtuu kokonaan ruiskubetonin alueella, se antaa tartuntalujuudelle alarajan.



Kuva 19. Tartuntalujuuden määrittäminen. [SFS-EN 14488-4 + A1]

Tartunta koputtamalla on enemmän työmailla käytetty keino tartuntalujuuden arvioimiseksi. Tämä johtuu siitä, että mittauksiin perustuvat tartunnan varmistamiset ovat epävarmoja. Niiden irtokäyttöön siten, että tartunta kestää on hyvin vaikeaa sillä kairaus rasittaa näytettä niin pieneltä alalta.

Koputtamalla tehtävä koe perustuu Hollménin [2015] mukaan ruiskubetonipinnan koputtamiseen vasaralla ja havainnoimiseen millainen ääni siitä kuuluu. Irtonaisesta ruiskubetonista kuuluva kumahdus eroaa selkeästi kalliosta kiinni olevaan ruiskubetoniin. Mikäli irronnut tartunta havaitaan, koputellaan ruiskubetonirakennetta sen ympäriltä, jotta saadaan rajattua alue ja merkitään se rakenteen pintaan. Tämän jälkeen suunnitellaan tapauskohtaisesti toimenpiteet mitä tehdään, joita ovat esimerkiksi: irronneen ruiskubetonin poistaminen ja uuden ruiskubetonin asentaminen tai irronneen alueen pulittaaminen kiinni kallioon. Koputuskokeen ongelmana on erottaa irronnut tartunta irtonaisesta alustasta, jossa ruiskubetoni on kuitenkin kiinni (esim. louhinnan rikkovyöhyke). Se voi siis antaa hieman liian konservatiivisen tuloksen.

4 Polymeerikuituvahvisteinen ruiskubetoni

4.1 Kuitumateriaalien toimintaerot

4.1.1 Energian sitominen

Energian absorptio määritetään luvussa 3.2.6 esitetyllä EFNARC-laattakokeella. Tässä luvussa keskitytään kuitujen ominaisuuksien vaikutukseen energian absorptiossa.

Sementtipitoisissa materiaaleissa rakenteen pettäminen johtuu olemassa olevien halkeamien leveyden liiallisesta kasvamisesta. Halkeama kasvaa koska betonin vetolujuus on heikko, vain noin 10 % sen puristuslujuudesta. Vetolujuuden parantamiseksi kuituja lisätään rakenteeseen. Jos halkeama kasvaa liikaa, niin laatan alapuoliset kuitut katkeavat ja rakenteeseen ei jää kuormia kantavia ehjiä kuituja jäljelle. Halkeilleessa betonissa kuitujen määrällä ja tartunnalla on suuri vaikutus betonin sitkeyteen. Salon [2010] mukaan käytettäessä rakenteellisia polymeerikuituja vahvistusmateriaalina kuituannostuksen kasvattaminen tietyn rajan yli voi huonontaa rakenteen energianabsorptiokapasiteettia. Teräskuiduilla vahvistetussa ruiskubetonirakenteessa kuituannostuksen kasvattaminen parantaa yleisesti energianabsorptiokapasiteettia. Tämä johtuu kimmomoduulien suuruksista, jolloin materiaalin ominaisuudet muuttuvat, kun niihin lisätään muita materiaaleja. Kuituannostus pitää kuitenkin määritellä oikein. Liikaa on liikaa ja liian vähän on liian vähän. Salon [2015] mukaan tavallisesti polymeerikuitujen annostus per kuutio on luokkaa 3...10 kg/m³ ja teräskuiduilla 45...60 kg/m³.

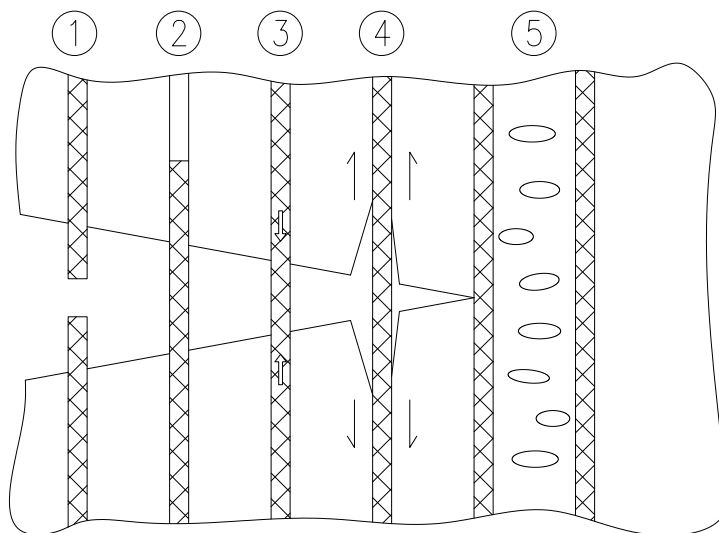
Kuormituksen alkaessa laatan kuormat ovat betonin toiminnan varassa, kunnes betonin vetolujuus laatan alapinnassa ylittyy, tapahtuu Salon [2014] mukaan tartunnan kehittymistä josta seuraa pieni siirtymä jonka jälkeen veto siirtyy vahvistekuiduille. Tästä johtuen EFNARC-laattakokeen tulokset näyttävät teräskuitujen ja polymeerikuitujen osalta hyvin vastaavilta ennen ensimmäistä halkeamaa. Ruiskubetonin vahvistuksessa käytettävillä polymeerikuiduilla on onnistuttu mitoittamaan sitkeästi käyttäytyviä rakenteita.

Teräskuiduilla vahvistetun rakenteen halkeamisen jälkeen sen kyky ottaa kuormia vastaan laskee äkillisesti. Mikäli teräskuiduilla vahvistettu testilaatta murtuu, kasvaa testi-laatan taipuma merkittävästi ja kuormankantokyky tasaantuu äkillisen laskun jälkeen,

kun laatan taipumaa katsastellaan taipumavälillä 0 – 25 mm. Mainintana, että teräskuiduilla on myös onnistuttu mitoittamaan sitkeästi käyttäytyviä rakenteita.

Polymeerikuiduilla vahvistettu laatta käyttäytyy kuormitustilanteessa eri tavoin ensimmäisen halkeaman jälkeen kuin teräskuiduilla vahvistettu. Polymeerikuiduilla vahvistetun laatan ensimmäinen halkeama syntyy alhaisemmilla kuormilla kuin teräskuiduilla vahvistetussa laatussa. Tämä johtuu siitä, että polymeerikuitujen pienempi kimmokerroin ei kasvata komposiittirakenteen kimmokerrointa samoin kuin teräskuidut. Tämä ero näkyy EFNARC-laattakokeen kuvaajan maksimikuormassa.

Salon [2010] mukaan kuitujen toiminnan keskeyttäviä toimintamalleja kuvataan kuitumekanismeiksi, joita ovat: kuidun pettäminen (1), kuidun ulosvetäytyminen (2), kuorman siirtäminen halkeaman yli (3), kuidun tai betonin osittainen tartunnan pettäminen (4) ja betonin murtuminen (5). Kuitujen toimintaan liittyvät mekanismit halkeilleessa betonissa ovat esitetty kuvassa 20, joihin liittyy yllä olevien kuitumekanismien perässä oleva numerointi. Kuvassa 20 esitettyjen mekanismien ilmenemiseen vaikuttavat kuidun tartunta, kuitumateriaali ja betonin ominaisuudet.

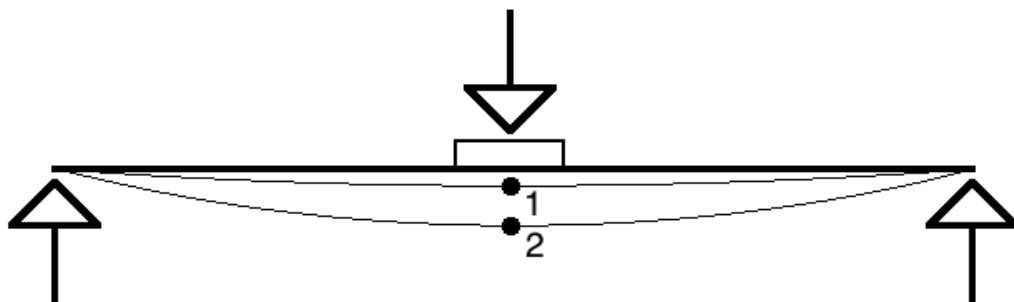


Kuva 20. Kuitumekanismit [Anderson 1991]

Parantaakseen mahdollisimman paljon ruiskubetonin sitkeysominaisuuksia, kuidun tulisi Salon [2010] mukaan pettää asteittaisesti tartunnan menettämisestä aiheutuvan ulosvetäytymisen seurauksena. Kuidun muotoilulla on suuri vaikutus kuidun ja betonin

välille syntyvän kitkan suuruuteen. Kuituun kohdistuu vetoa ja jotta kuitu voisi toimia, vaatii se riittävän tartuntapinta-alan. Kuitujen ulosvetäytyminen mahdollistaa rakenteen sitkeän murtumisen. Betonin lujuusluokalla ja kuitutyypillä on suuri merkitys vaikuttavaan kuitumekanismiin. Salon [2010] mukaan kuidut voivat siirtyä ennen tartunnan kehittymistä, jonka vuoksi rakenteen vetolujuus pienenee hetkellisesti halkeilun alkuvaiheessa. Tämä tartunnan uudelleen kehittyminen näkyy testituloksen kuvaajassa pienellä notkahduksena kuormituskäyrässä.

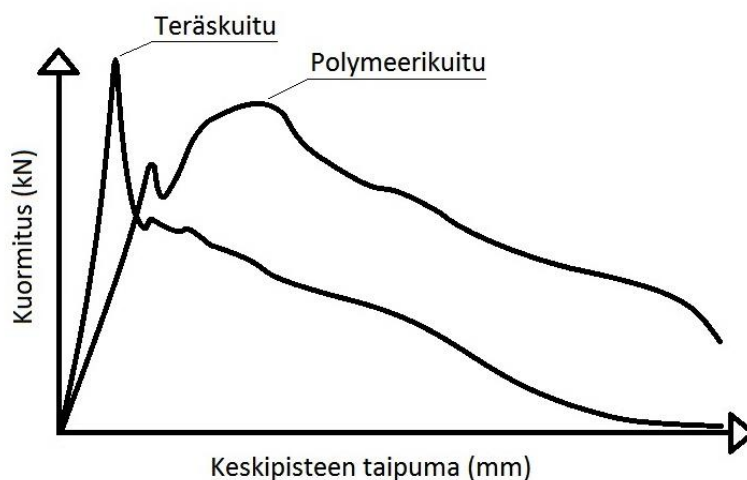
Kuvassa 21 esitetyt koelaatan kuormituksessa esiintyvät taipuma-arvot ovat erisuuruiset johtuen ruiskubetonia vahvistavista kuiduista. Kuitujen kimmokertoimet vaikuttavat ruiskubetonin kimmomoduuliin, siten taipumaan ja sitä seuraavaan käyttäytymiseen. Kuvassa 21 on hahmoteltu teräskuiduilla ja polymeerikuiduilla vahvistetun laatan toimintaa EFNARC-laattakokeessa. Kuorma molemmissa laatoissa on sama ja tilanne on ennen ensimmäistä halkeamaa laatussa. Tarkoituksena on havainnollistaa laatan käyttäytymistä kuormituksen alla ja karrikoidusti osoittaa laattojen toiminnallinen ero. Pallo 1 kuvaa teräskuiduilla vahvistetun testilaatan alapinnan taipumaa ja pallo 2 puolestaan polymeerikuiduilla vahvistetun laatan alapinnan taipumaa.



Kuva 21. EFNARC-laattakokeen taipuma [Kuva: Pihlström 2014]

Ruiskubetonin kimmomoduulin suuruus joko kehittyy tai heikentyy riippuen siitä, millaista materiaalia siihen lisätään. Kimmomoduuli kasvaa, kun pehmeämpään materiaaliin lisätään kovempaa materiaalia ja päinvastoin. Koska teräskuidut kasvattavat ruiskubetonin kimmomoduulia, sen taipuma samassa kuormitustilanteessa on huomattavasti pienempi kuin polymeerikuiduilla vahvistetun laatan. Polymeerikuidut sallivat laatussa enemmän taipumaa tehden rakenteesta joustavamman ja sitkeämmän kuin teräskuituja käytettäessä. Tätä tilannetta voidaan tarkastella myös EFNARC-laattakokeesta syntyvästä kuormitus-taipumakuvaajasta, jolloin teräskuiduilla vahvistetun laatan kulma-kerroin on jyrkempi ennen ensimmäistä halkeamaa kuin polymeerikuituvahvisteisen

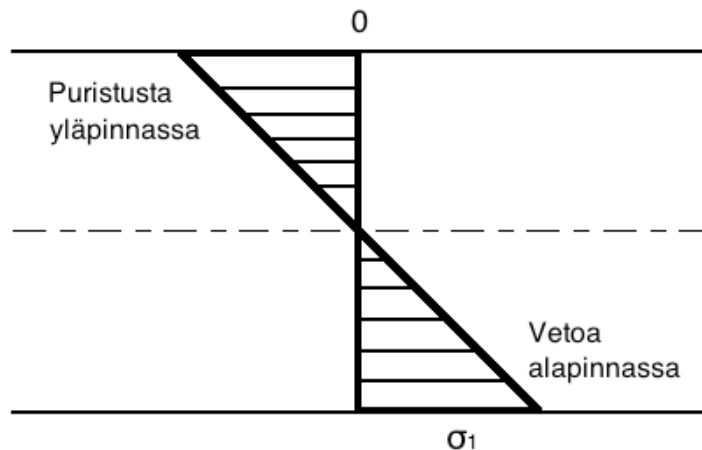
laatan. Kuvassa 22 on esitetty molempien kuitutyypin käyttäytyminen EFNARC-laattakokeessa samassa kuvaajassa.



Kuva 22. Kuitutyypin käyttäytyminen EFNARC-laattakokeessa [Kuva: Pihlström 2015]

Kuormitusta vietäessä pidemmälle teräskuitujen osalta laatta halkeaa ensimmäisen kerran, jonka jälkeen muodonmuutoskyky on menetetty lopullisesti, jolloin laatta ei ole enää kykeneväinen ottamaan suurempia kuormia vastaan. Polymeerikuitujen tapauksessa laatta halkeaa aikaisemmin, mutta ruiskubetonin sitkeyden takia kuormitusta voidaan jatkaa. Olettaen, että kuituja on riittävästi eli rakenne on mitoitettu oikein.

Ruiskubetonin toiminta perustuu betonin veto- ja puristuslujuuteen ennen ensimmäistä halkeamaa, jonka jälkeen kuormat laatan alapinnassa siirtyvät polymeerikuiduille. Kuvassa 23 on esitetty poikkileikkaus kuvassa 21 esitetyn laatan keskikohdasta. Laatan yläpintaan syntyy puristusta, jota betoni kestää materiaalina hyvin. Laatan alapintaan syntyvä vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden, jonka jälkeen voimat jakaantuvat kuiduille. Rakenne pettää lopullisesti, kun jokin kuitumekanismeista tapahtuu.



Kuva 23. Taivutusjännitykset laotassa [Kuva: Pihlström 2014]

Hyvin toimivilla polymeerikuiduilla ja oikein mitoitettulla rakenteella laatan maksimikuormitus saavutetaan vasta halkeamisen jälkeen, kun voimat ovat jakaantuneet tasaisesti kuiduille. Sitkeästi toimiva rakenne voidaan myös saavuttaa oikealla suunnittelulla teräskuituja käyttämällä. Salon [2010] mukaan rakenteellisesti optimaalinen polymeerikuitu ei myötää, vaan lopulta pettää tartunnan menetyksen takia. Polymeerikuiduilla vahvistetun laatan energia-absorption kuvaaja kehittyy tasaisesti ja hyvin toimivilla polymeerikuiduilla kuvaajan muoto on enemmän kuitujen vastuulla. Tämä perustuu kuitujen ideaalimäärään ruiskubetonimassassa, koska rakenteen toiminta perustuu pitkälti siihen mitä tapahtuu ensimmäisen halkeaman jälkeen. Halkeaman jälkeen betonin tehtävänä on ottaa vastaan puristusjännitys ja pitää kuidut sidottuna paikallaan rakenteessa.

4.1.2 Kuitujen muoto

Ruiskubetonin vahvistamisessa käytettävät kuidut eroavat muodoiltaan toisistaan. Tämä johtuu siitä, että vahvistekuitujen valmistajat tekevät jokainen oman näkemyksensä mukaan parhaiten toimivia kuituja. Euroopassa käytettävien kuitujen on oltava CE-merkittyjä.

Polymeerikuidut ovat kuitenkin muodoltaan pääasiassa pitkulaisia kuituja, mutta myös muotoiltuja kuituja valmistetaan. Polymeerikuitujen valmistustapa vaikuttaa kuitujen muotoon. Kuitujen valmistustavat ovat mainittu luvussa 2.4.2. Kuidun pinta voi olla mekaanisesti muotoiltu, tasainen tai kemiallisesti käsitelty. Kuidun mittojen tulee olla sellaisia, että ne sopivat käytettäväksi betonissa ja ruiskutuskalustossa.

Teräskuitu on tavallisesti kylmävedetty tai leikattu muotoonsa. Teräskuidun muotoilu on valittu siten, että se sopii käytettäväksi ruiskubetonissa ja tarjoaa hyvän tartunnan betoniin.

Teräskuitu on muotoiltu siten, että sen päädyissä voi olla koukut, suurennetut tai tyssätyt päädyt, jotka yhdistyvät keskellä olevalla suoralla osuudella. Vaihtoehtoisesti kuidun poikkileikkauksesta voidaan tehdä epäsäännöllinen. Näiden muotoilujen taustalla on kasvattaa teräskuidun ulosvetokestävyyttä. Geng [1995] mukaan ulosvetokestävyys parantaa siten ruiskubetonin lujuutta, väsymis- ja dynaamisen kuormituksen kestävyttä sekä vähentää kutistumishalkeilua ja pienentää halkeamaleveyttä.

4.1.3 Kuitujen tartunta

Kuitujen tartunta betoniin perustuu kitkavoimaan. Mitä karheampi kuidun pinnan kuvio, sitä suurempi tartuntapinta-ala sillä on. Kuitu ei toimi, jos se menettää tartuntansa tai katkeaa.

Polymeerikuituja valmistettaessa niille voidaan luoda pintakuvio tai toivottu muoto. Teräskuitujen pintamateriaali on kuitenkin useimmiten sileä, joten sen tartunta toteutetaan aikaisemmin mainitun muotoilun avulla, jolloin kuidun pää ankkuroituu kovettuneeseen betoniin. Kuidun vahvistuskyky katoaa, kun rakennetta kuormitettaessa jokin kuitumeکانismeista tapahtuu. Kuitumeکانismit on esitetty kuvassa 20. Teräskuidun tapauksessa yleisin murtumismekanismi on Salon [2014] mukaan tartunnan peittäminen ja harvemmin kuidun katkeaminen. Polymeerikuitujen tapauksessa yleisin murtumismekanismi on kuidun tai tartunnan peittäminen.

4.1.4 Betonilaatu

Betonilaatu vaikuttaa betonin vetolujuuteen ja kuidun ja betonin välisen tartunnan suuruuteen. Ruiskubetonirakenteen toiminnan kannalta betonin ja kuitujen tulee toimia yhdessä. Salon [2010] mukaan betonin ominaisuudet vaikuttavat rakenteen murtumistapaan. Mikäli kuituja ympäröivä betoni ei ole tarpeeksi lujaa, peittää kuitujen tartunta ja kuidut repeävät irti rakenteesta liian helposti. Mikäli käytettävä betonilaatu olisi lujempaa, kuituja voisi kuormittaa enemmän paremman tartunnan vuoksi. Tässä tapauksessa kuitujen vetokapasiteetista jää käyttämättä potentiaalia ja rakenne ei ole optimaali-

nen, jolloin ei saavuteta rakenteelle mahdollista lujuutta. Betonin lujuuden kasvattaminen ei kuitenkaan aina paranna ruiskubetonirakenteen ominaisuuksia. Ruiskubetonin sitkeysominaisuudet katoavat, mikäli käytetään liian lujaa betonia.

Betonin lujuusluokka vaikuttaa Salon [2010] mukaan kuidun tartuntaan ja siten lopulta rakenteen pettämiseen johtavaan kuitumekanismiin. Polymeerikuitujen tartunta perustuu kitkavoimaan betonin ja kuitujen välillä. Teräskuitujen tartunta puolestaan perustuu kuitujen muotoon ja betonin kykyyn vastustaa muodonmuutosta, jolloin kuidut eivät pääse liikkumaan rakenteessa.

Mikäli käytettävä betonilaatu on liian lujaa, tapahtuu rakenteen murtuminen ”ei toivotulla” tavalla. Kun kuituja paikallaan pitävä kitkavoima on liian suuri, ettei hallittua tartunnan menetystä saavuteta ja kuitu katkeaa yllättäen, niin rakenne ei esitä ennakkoon merkkejä sen kantokyvyn menetyksestä. Tässä tapauksessa kuormitus kasvaa tiettyyn pisteeseen, jolloin ruiskubetonirakenne ei enää kykene vastustamaan kuormitusta vaan se murtuu. Tällöin käytettävän betonilaadun lujuusluokan tulisi olla alhaisempi, jotta kuidut eivät katkeaisi yllättäen kuormituspiikistä, vaan voimat rakenteen sisällä jakautuisivat tasaisesti ensin kuiduille ja mahdollinen murtuminen tapahtuisi asteittain. Jos voimia ei saada siirrettyä kuiduille rakenteen sisällä kuormituksen aikana, on niitä turha laittaa rakenteeseen.

Ruiskubetonin laatuvaatimukset määritellään suunnitelma-asiakirjoissa. Alla on esimerkkinä lueteltu Länsimetro-hankkeesta erään louhintaurakan kalliorakennustöiden rakennusselostuksessa märkäruiskubetonille asetetut vaatimukset:

- Lujuusluokka C30/37, rakenneluokka 2, rasisuusluokka teräskuituvahvisteisessa ruiskubetonissa XC3 ja XF1 ja paikoin XS2 sekä XD1. Polymeerikuituvahvisteisen ruiskubetonin ja vahvistamattoman ruiskubetonin rasisuusluokka XF1 sekä paikoin XD1. E1000
- Runkoaineen suurin raekoko 8...12 mm.
- Paineellisen veden tunkeumasyyvyys ≤ 50 mm.
- Sementti CEM I, CEM II tai CEM III, normaali tai nopeasti kovettuva
- Notkeus korkeintaan S3 (vetelä)
- Tiheys >2200 kg/m³

4.1.5 Kimmokerroin

Kimmokerroin kuvaa materiaalin kykyä vastustaa voimia. Ruiskubetonissa kimmokerrointa voidaan Salon [2015] mukaan katsastella kulmakertoimenä kuormituskäyrässä. Kuvaajassa kuormituksen suhteessa taipumaan käyrän kulmakerroin havainnollistaa eroja ruiskubetonin vahvistukseen käytettävien kuitujen osalta. Toisin sanoen kimmokerroin kuvaa kappaleen venymistä venyttävän voiman vaikutuksesta. Kimmokerroin voidaan määrittää laskemalla eri materiaaleille kaavalla 5.

$$E = \frac{F l}{A \Delta l} = \frac{\sigma}{\epsilon}, \quad (5)$$

jossa E on kimmokerroin (N/m^2), F on kappaletta venyttävä voima (N), A on kappaleen poikkileikkauksen pinta-ala ennen venyttämistä (m^2), l on kappaleen pituus (m), Δl on pituuden muutos jännityksen suuntaan (m), σ on kappaleeseen kohdistuva jännitys ja ϵ on suhteellinen venymä.

Ruiskubetoni on liittorakenne, jonka materiaaliominaisuus riippuu yhdessä toimivista materiaaleista. Luvussa 4.1.1 mainitun kimmomoduulin suuruus vaihtelee riippuen siihen lisättävien materiaalien ominaisuuksista. Ruiskubetonin vahvistamisessa käytettävien teräskuitujen kimmokerroin on noin 210 GPa ja polymeerikuitujen kimmokerroin on noin 4...10 GPa (riippuen käytettävästä polymeerikuidusta). Kimmokerroin kertoo jo pelkän lukemansa vuoksi, että teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni on lujempaa kuin polymeerikuidulla vahvistettu ruiskubetoni. Kimmokertoimen numeerisesta arvosta ei pidä vetää suoria johtopäätöksiä, sillä erilaiset kuidut mahdollistavat rakenteiden erilaiset toimintatavat, jotka ovat molemmat hyviä eri tarkoituksiin.

Korkeasta kimmokertoimesta voidaan päätellä ruiskubetonin olevan vähemmän taipuisa kuin pienemmän kimmokertoimen omaava ruiskubetoni. Myös rakenteelle odotettavat huippukuormat ovat todennäköisesti suurempia, mitä korkeampi ruiskubetonin kimmokerroin on. Teräskuidulla saavutettu luja ruiskubetonirakenne joustaa vähemmän kuin polymeerikuidulla vahvistettu sitkeä ruiskubetoni. Ruiskubetonin ominaisuudet riippuvat kuitenkin myös muista tekijöistä kuin pelkästä vahvistusmateriaalina käytettävästä kuiduista. Polymeerikuidulla vahvistettu ruiskubetoni voi olla myös lujaa ja sen sitkeysominaisuudet voidaan Hollménin [2015] mukaan pilata käyttämällä turhan lujaa betonia. Vertailtavien koekappaleiden, niiden reseptien, käytettävien kuitujen

(merkkikohtaiset erot), kuitujen määrät, ruiskuttajan ammattitaito ja kiihdyttimen määrä vaikuttavat ruiskubetonin ominaisuuksiin ja sen toimintaan.

Jossain tilanteissa rakenteelta edellytetään sellaisia ominaisuuksia, jotka saavutetaan vain toisella kuitutyypillä. Näissä tilanteissa voidaan edellyttää esimerkiksi polymeerikuitujen käyttöä sillä niiden kimmokerroin on aina teräskuituja pienempi. Polymeerikuituja käyttämällä rakenteelle saadaan aikaan joustava ominaisuus, mutta rakenteen murtokestävyys on osaltaan pienempi Salon [2015] mukaan.

Ruiskubetonirakenne palautuu kuormituksesta sen alkuperäiseen muotoonsa, tiettyyn pisteeseen asti. Kun rakennetta kuormittava jännitys on murtorajaa pienempi, rakenne venyy kimmoisasti eli palautuu alkuperäiseen muotoonsa jännityksen loputtua. Jos jännitys on niin suuri, että saavutetaan plastinen alue, kappaleeseen aiheutuu jännityksestä pysyvä muodonmuutos. Käytettäessä teräskuituja vahvistusmateriaalina, rakenne on lähes käyttökelvoton ensimmäisen halkeaman jälkeen, koska sen kuormitus viehdään rakenteen kimmoisan alueen yli. Rakenne kyllä palautuu hieman, mutta halkeamat ovat kasvaneet niin suuriksi, ettei sillä enää ole paikallisesti käyttöarvoa. Polymeerikuitujen mahdollistaman joustavuuden ansiosta rakenne palautuu paremmin kuormitustilanteesta halkeaman jälkeen, kuin teräskuitujen tapauksessa. Tässä on kuitenkin muistettava, että polymeerikuiduilla vahvistetun ruiskubetonin ensimmäinen halkeama syntyy kuormitustilanteessa aiemmin kuin teräskuiduilla. Mikäli polymeerikuiduilla vahvistettua ruiskubetonia kuormitetaan samalla voimalla kuin teräskuiduilla vahvistettua, ei polymeerikuiduillakaan vahvistettu ruiskubetoni palaudu enää entisellensä.

Teräskuiduilla vahvistettua ruiskubetonirakennetta voidaan pitää parempana lujitusvaihtoehtona siinä tapauksessa, jos kuormitus on sellainen, että teräskuiduilla vahvistettuun ruiskubetoniin ei synny halkeamaa, mutta polymeerikuiduilla vahvistettuun rakenteeseen syntyy. Tällöin teräskuiduilla vahvistettu ruiskubetonirakenne on parempi vaihtoehto, koska siihen ei synny rakennetta vaarantavia halkeamia.

4.1.6 Kuitutyypien vertailu

Taulukkoon 6 on kerätty teräskuitujen ja synteettisten polymeerikuitujen ominaisuuksia, josta voi tarkastella materiaalien keskinäisiä eroavaisuuksia.

Taulukko 6. Teräskuitujen ja synteettisten kuitujen tyyppillisten ominaisuuksien vertailu [Wimpeny et al. 2013].

Ominaisuus	Teräs kuidut	Synteettiset makrokuidut
Kuitujen ominaisuudet		
Muoto/tekstuuri	Kylmävedetty, koukut päissä	Jatkuva kuviointi
Koottu	Liimattu nippuihin	Sidottu nippuihin
Pituus (mm)	n. 60 - vaihtelee	n. 48 - vaihtelee
Halkaisija (mm)	0.75	0.5 - 1
Vetolujuus (MPa)	>600	550
Kimmokerroin (GPa)	~210	10
Annostus (kg/m ³)	45 - 60	3 - 10
Käyttölämpötila (°C)	300	60
Sulamispiste	>800	150
Raakamateriaali	Hiiliteräs	Polyolefiini (polypropeeni ja polyeteeni)
Vertailu perinteisen betonin kanssa (Vahvistamaton, paitsi missä merkitty *:llä)		
Työstettävyys	Heikentää	Hieman heikentää
Varhaishalkeilu	Ei vaikutusta	Hieman vähentää
Varhaislämpösäröily	Vähäistä	Vähäistä
Pitkäaikainen kutistumahalkeilu	Vähäinen	Ei tiedossa
Korroosiokestävyys	Vähäinen	Paranee
Kloridikestävyys*	Paranee	Paranee huomattavasti
Palon lohkeilukestävyys	Paranee hieman	Paranee
Puristuslujuus	Ei vaikutusta	Ei vaikutusta, ellei paljon kuituja
Jäännöstäivutuslujuus	Paranee	Paranee
Iskusitkeys	Paranee huomattavasti	Paranee
Puristusvetotaivutus	Paranee	Paranee
Hankauskestävyys	Paranee	Hieman paranee
Jäädytys-sulatuskestävyys	Paranee hieman	Paranee hieman
Energian absorptio	Paranee huomattavasti	Paranee huomattavasti
Betonin kaasunläpäisevyys	Paranee hieman	Paranee hieman
Ruiskubetonilaitteiston pumpun kuluminen	Lisääntyy	Ei vaikutusta
Työturvallisuus*	Terävät kuidut ovat vaarallisia käsitellä ja esiin työntyvät kuidut ovat teräviä	Ei vaikutusta
Viimeistely	Erityistä varovaisuutta hierron aikana	Kuidut voivat kellua ja työntyä esiin huonosti suunnitelluissa massoissa

4.2 Kuidut käyttöympäristössä

4.2.1 Viruma & korroosio

Jo aiemmin esiin tullut korroosio on teräskuidun suurin ”vihollinen”. Raudan ruostuessa sen poikkileikkauspinta-ala pienenee, jolloin sen vetokapasiteetti heikkenee samassa suhteessa. Salon [2015] mukaan teräskuitujen osalta korroosion tapauksessa tulee huomioida korroosionopeus ja suunnittelukäyttöikä.

Polymeerikuitu ei jaa samaa ongelmaa, mutta sen heikkous on muoville tyypillinen viruma. Muovia yleensäkin kuormitettaessa tiedetään, että mikäli rasitus on riittävän pieni, palaa muovi takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Käytännön hyvänä esimerkkinä on tavallinen muovinen kauppakassi. Mikäli muovikassiin lastataan kevyt kuorma ja sen jälkeen kuorma poistetaan, se palautuu alkuperäiseen muotoonsa. Mikäli muovikassi puolestaan ladataan raskaasti ja kuorma poistetaan, on kassiin syntynyt pysyvä muodonmuutos.

Rakenne viruu Salon [2010] mukaan silloin, kun kuiduissa tapahtuva muodonmuutos kasvaa ajan suhteen kuormituksen pysyessä muuttumattomana. Tämän muodonmuutoksen tuloksena on kuitujen venyminen pituuden suhteen ja poikkipinta-alan pieneminen.

Viruman syntymiseen vaikuttaa kuorma. Jos kuorma on riittävän alhainen eikä halkeaminen johdu rakenteen ulkopuolisista kuormista, on mahdollista ettei virumaa tapahdu. Halkeaminen voi johtua Salon [2015] mukaan myös sisäisistä pakkovoimista esimerkiksi kutistumisen tai lämpötilan vaikutuksesta. Mikäli ruiskubetonirakenne halkeaa ja kuormitus siirtyy kuiduille, on viruma pidemmän aikavälin seuraus.

Kun polymeerikuitu viruu, sen poikkipinta-ala pienenee ja samalla kuidun vetolujuus heikkenee samassa suhteessa. Bernardin [2009] mukaan polymeerikuidut palautuvat alkuperäiseen muotoonsa alle 40 % pysyvän kuormituksen maksimiarvosta, jolloin virumaa ei pääse syntymään. Mikäli polymeerikuituihin kohdistuu tätä suurempia kuormituksia, osa muovikuiduista venyy viruman vuoksi huomattavasti. Salon [2014] mukaan tämän takia rakenteet mitoitetaan siten, että mitoituskuorma koko rakenteelle on 40 % sen kapasiteetista.

4.2.2 Käyttöikä

Salon [2015] mukaan teräskuitujen käyttöikä voidaan osoittaa laskennallisesti käyttöikämäärittelylle. Kuitujen todellisen käyttöiän arviointi on kuitenkin vaikeaa, ellei jopa mahdotonta, sillä ympäröivät olosuhteet määrittävät lopulta kuidun käyttöiän. Mikäli korrosio ei pääse vaikuttamaan teräkseen, voidaan sitä pitää hyvin pitkäikäisenä tuotteena rakennusmaailmassa. Esimerkiksi vuonna 1781 valmistunut The Iron Bridge on edelleen käytössä Englannissa. Teräskuitu ei siis menetä sen lujituskapasiteettiaan pysyessään kunnossa.

Tunnelissa on kuitenkin omat haasteensa. On hyvin todennäköistä, että jossain vaiheessa rakenteen käyttöikää se joutuu alttiiksi kosteudelle, joka vaikuttaa käyttöikään. Teräskuidun käyttöikä lyhenee korroosion takia, kun kuidun poikkipinta-ala pienenee. Poikkipinta-alan pienetessä pienenee myös kuidun kapasiteetti ottaa vastaan kuormia. Korrodoivassa ympäristössä voidaan käyttää ruostumattomasta, haponkestävästä tai kuumasinkitystä teräksestä valmistettuja kuituja pidentämään käyttöikää. Näitä kuituja käytettäessä kustannukset ovat moninkertaiset verrattuna tavallisiin teräskuituihin.

Polymeerikuidun käyttöikä puolestaan ei ole riippuvainen kosteudesta tai niinkään ympäristöstä, pois lukien kuituun kohdistuva UV-säteily. Suojoen [2006] mukaan auringon UV-säteily voi käynnistää polymeerikuiduissa kemiallisen reaktion, joka saattaa aiheuttaa värin haalentumista, kemiallisten sidosten hajoamista sekä kemiallisten ja fysikaalisten ominaisuuksien heikkenemistä. Aggressiivisen pohjaveden mukana kulkevan maaperän vahvimman hapon (rikkihappo) vaikutus polypropeeniin ja polyeteeniin on käytännössä olematon. Kansainvälisen betoniliiton (FIB) [2010] julkaisun mukaan pohjaveden mukana liikkuva rikkihappo, hiilidioksidi ja orgaaniset hapot kuten fulvohappo ja humushappo voivat kuitenkin johtaa betonin rappeutumiseen.

Ympäristön vaikutuksista tärkein kuidun toiminnan kannalta on polymeerikuitujen vetolujuuden heikkeneminen. Tämä ei suoranaisesti tuhoa kuitua, mutta vaikuttaa oleellisesti sen kestävyteen ja kykyyn ottaa vastaan kuormia. Polymeerikuidun ominaisuuksia ovat notkeus ja kimmoisuus. Kun kuitu haurastuu, se menettää Salon [2015] mukaan sen joustavuuden ja kuormitettaessa murtuu herkemmin. Kuituja valmistettaessa käytettävän polymeerin tulee soveltua käytettäväksi emäksisessä betonissa. Koska polymeerikuidulla vahvistettu ruiskubetoni on rakennusmaailmassa vielä suhteellisen

uusi rakennusmateriaali, ei polymeerikuitujen käyttöiästä löydy vielä pitkän aikavälin käyttökokemuksia.

Bernardin [2008] raportin mukaan Australiassa on meneillään vuonna 2005 alkanut pitkän aikavälin testit, joissa tutkitaan iän vaikutusta rakenteen sitkeyden kehittymiseen. Testissä käytettävänä vahvistusmateriaaleina on mukana kaksi muovikuitutyyppiä, teräskuitutyyppi ja teräsverkkotyyppi. Kolmasosa laatoista säilytetään vedessä koestukseen saakka ja loput 60 laattaa säilytetään ulkona otollisissa olosuhteissa. Ulkona säilytettävät laatat kuormitettiin murtoon 56 päivän iässä, jotta niiden haurastumisen ja korroosion vaikutuksia voidaan tutkia tarkemmin. Kokeista odotetaan tuloksia vielä vuoden 2015 aikana.

5 Yhteenveto

Tässä työssä on käyty läpi polymeerikuiduilla vahvistetun ruiskubetonin laatuvaatimuksia ja laadunvarmistusmenetelmiä, joilla varmennetaan rakenteen toimivuus. Seuraavaksi työssä käsitellään aiemmin kerrottujen ruiskubetonin laadunvarmistusmenetelmien ja laatuvaatimusten tärkeimmät johtopäätökset.

5.1 Laadunvarmistusmenetelmät

Rakennushankkeessa ruiskubetonille tehtävien kokeiden kohdalla on syytä tarkastella ovatko kaikki kokeet tarpeellisia ja pyrkiä löytämään oleellimmat rakenteen toimivuuden kannalta ja sen kannalta, millä varmistetaan, että massa vastaa kokeissa testattua. Laadunvarmistusmenetelmien rajaaminen kahteen luokkaan on vaihtoehto testien tiivistämiselle kalliorakennushankkeissa. Jakamalla ruiskubetonille tehtävät kokeet kahteen ryhmään - massan koostumukseen liittyviin ominaisuuksiin ja ruiskubetonin toimivuuteen liittyviin ominaisuuksiin - on mahdollista tuottaa tarkemmin suunnattuja kokeita hankkeen eri vaiheissa. Koemäärät ja vaatimukset tehtävistä kokeista tulevat kuitenkin standardeista ja välillä ei voida kuin totella ohjeistusta, vaikei siinä välttämättä järkeä olisikaan.

Ruiskubetonimassan ominaisuuksiin liittyvistä kokeista saatavat arvot kertovat massan koostumuksesta, käsiteltävyydestä ja standardien vaatimuksissa annettujen kriteereiden täyttämistä. Nämä kokeet, joiden tuloksia säädellään massan suhteutuksella tulee teettää ennen ruiskutuksen aloittamista. Näin varmistutaan standardien vaatimusten täyttymisestä. Näillä ei kuitenkaan ole varsinaista virkaa ruiskubetonirakenteen toimivuuden kannalta. Suunnitelma-asiakirjoissa ei kannattaisi vaatia ruiskubetonimassan ominaisuuksiin liittyviä kokeita, jotka ovat lueteltu alla.

- notkeus
- tiheys
- säilyvyys (valmiissa rakenteessa)
- pakkasen kestävyys (valmiissa rakenteessa)

Onnistuneen rakenteen kannalta on tärkeämpää, että käytettävä ruiskubetoni on toimivaa sen käyttötarkoitukseensa nähden kuin massan ominaisuuksien tutkiminen. Lopulta vain sillä on merkitystä, että ruiskubetoni tekee sen mitä sen pitääkin tehdä. Sen takia hankkeen aikana on tärkeämpää keskittyä niiden kokeiden tekemiseen, jotka oikeasti kertovat ruiskubetonimassan vahvistusominaisuuksista kalliorakennuskohteessa ja antavat kuvan rakenteen toiminnasta kuormituksen alla. Näiksi kokeiksi, jotka kannattaisi vaatia suunnitelma-asiakirjoissa, voidaan luetella alla olevat.

- laattakoe
- palkkikoe
- puristuslujuus
- kuitumäärä
- paksuuden mittaus
- tartunnan varmistaminen

Laattakoe on tärkein yksittäinen koe ruiskubetonin lujitusominaisuuksien testaamiseen. Palkkikoe on harvemmin käytetty kalliorakennuskohteissa, sillä se kuormittaa kuituja vain yhdestä suunnasta. Ruiskubetonin puristuslujuus koestetaan, jotta voidaan varmistua rakenteen toimivuudesta kuormituksen alla. Kuitumäärällä vaikutetaan ruiskubetonin sitkeyteen (energian absorptio) ja on tärkeää varmistaa, että rakenne todella vastaa sitkeyden osalta suunnittelua. Tätä voidaan mitata varmistamalla kuitumäärä. Julkaisun alla olevan ruiskubetonityöohjeen BY63/2015 mukaan ruiskubetonikerroksen paksuus mitataan ennen kuiduttoman ruiskubetonikerroksen levittämistä. Tällä tavoin voidaan varmistua nimenomaan vahvistetun ruiskubetonikerroksen paksuudesta ja porattu mittausreikä saadaan peitettyä suojakerroksen ruiskuttamisen yhteydessä. Tämä määräys palvelee parhaiten teräskuituvahvisteisen ruiskubetonin käyttöä, sillä muissa ruiskubetonimassoissa ei välttämättä käytetä suojabetonikerrosta.

Ylipäätänsä suunnitelma-asiakirjoissa kannattaisi poiketa laattakokeesta ja käyttää mm. Länsimetro-hankkeessa hyväksi koettua neljän onnistuneen laatan sarjaa. Tämä tarkoittaa, että hankkeeseen kuuluvien ruiskubetonitöiden aikana valvojan määritteleminä ajankohtina kuituruiskubetonista määritettäisiin kolmesti (3) energianabsorptiokapasiteetti neljän (4) onnistuneen EFRNARC-laattakokeen sarjana urakassa käytettävillä kuitutyypeille.

5.2 Laatuvaatimukset

Laattakokeesta saatavat tulokset kertovat yksityiskohtaisimmin ruiskubetonin toiminnasta. Kuvaajien analysoiminen ja niiden esittämän tiedon ymmärtäminen rakenteen lujitusominaisuuksien tarkastelussa on hyvin tärkeää. Kokeesta saatavien tietojen perusteella voidaan tarkastella kestäkö ruiskubetonirakenne sille kaavailut kuormat ja vastaako rakenteen toiminta suunniteltua.

Polymeerikuiduilla vahvistetun ruiskubetonin toiminta poikkeaa kuormitustilanteessa jonkin verran teräskuiduilla vahvistetun ruiskubetonin toiminnasta. On tärkeää ymmärtää näiden kahden eri rakenteen toiminnalliset erot ja niiden ominaisuudet. Koska rakenteet toimivat eri tavoin, olisi niiden ohjeistus ja laatuvaatimukset eriteltävä tarkemmin. Teräskuitujen osalta rakenteen maksimikuorma saavutetaan tyypillisesti juuri ennen rakenteen halkeamista, jolloin rakenteen tarkastelu kuormien kantokyvyn osalta päättyy. Suunniteltaessa teräskuidulla vahvistetun ruiskubetonin käyttöä, mitoitusperusteena toimii siis testilaatan toiminta ennen halkeamista. Polymeerikuitujen osalta rakenteen maksimikuorma saavutetaan kuitenkin useasti jo halkeilleessa rakenteessa, kun rakenteen toiminta on siirtynyt kuitujen varaan. Tällöin rakenteen mitoitusperuste ja ominaisuuksien tarkastelu olisi syytä suorittaa haljenneessa rakenteessa maksimikuorman mukaan eikä ensimmäisen halkeaman kohdalla. Rakenteen halkeilu voi joutua myös sisäisistä kuormista, jonka vuoksi rakenteen on kestävä ulkoiset kuormat myös halkeilleena. Siten rakenteen huippukuorman tulee suunnitelma-asiakirjoissa vaatia olevan suurempi kuin murtumiskuorman.

Standardeissa kuvattujen koestuksien määrää olisi ehkä syytä tarkentaa tunnelihankkeisiin paremmin sopiviksi. Ruiskubetonin kuuluessa tarkastuskategoriaan 3 tarkoittaa se, että esimerkiksi laattakokeita määrätään tehtäväksi 1 kpl ruiskutettu 500 m² kohden. Tämä tarkoittaisi esimerkiksi Länsimetron kokoisessa hankkeessa testilaatoista muodostuvan määrän nousevan yli tuhanteen kappaleeseen. Yhdestä koelaatasta muodostuu muutaman tuhannen euron kustannus. On turvallista sanoa, että tällainen koestuksen määrä ei ole taloudellista eikä tarpeellista, kunhan massan perusvalvonta tehdään vaatimusten mukaisesti.

5.3 Pohdintaa

Työn ulkopuolelle jäi tulosten analysoiminen kuitumäärän ja kuitumallin vaikutuksesta ruiskubetonirakenteen käyttäytymiseen. Tämä olisi aihe, josta olisi hienoa löytää riippuvaisuuksia ruiskubetonirakenteen toimintaan. Materiaalivalinnan vaikutusta suunnitteluun olisi hyvä tutkia vielä tarkemmin.

5.4 Loppusanat

Kirjoitin tämän insinööriyön talven 2014/15 aikana työpaikallani Saanio & Riekkola Oy:ssä, joka toimi myös työn tilaajana. Haluan kiittää tästä mahdollisuudesta tutustua näin mielenkiintoiseen aiheeseen. Erityiset kiitokset ansaitsevat Kalle Hollmén ja Olli Salo, jotka johdattelivat minut ruiskubetonin ihmeelliseen maailmaan ja auttoivat työn ohjauksessa. Kiitos insinööriyön valvojalle lehtori Jouni Kalliomäelle, joka kannusti vaikean aiheen parissa.

Kiitos kaikille läheisille tuesta opintojen ja tämän insinööriyön kirjoittamisen aikana. Valtava kiitos tyttöystävälle isoista voimahaleista ja ruoasta, ilman niitä tämä työ olisi jäänyt puolimatkaan. Kiitos vanhemmilleni, jotka ovat aina kannustaneet ja tukeneet minua valitsemillani poluilla. Työn tekemisen aikana asiantuntemukseni aihetta kohtaan on kasvanut valtavasti ja itsenäinen työskentely on päässyt puhkeamaan kukkaansa. Kaiken tämän oppimisen jälkeen olen valmis siirtymään kohti tulevia haasteita.

Nōn scholae, sed vītae discimus

Lähteet

Barton N., Lien R. ja Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 1974. Vol. 6, No 4. s.189-236

Barton N. ja Grimstad . Q-system. (Verkkodokumentti) Norja, 2002. Saatavissa: <http://www.ngi.no/en/Contentboxes-and-structures/Reference-Projects/Reference-projects/Q-method/>

Bernard E. S. Embrittlement of Fiber-Reinforced Shotcrete (Verkkodokumentti) Shotcrete, Summer 2008, 2008. s.16-21 Saatavissa: http://www.shotcrete.org/media/Archive/2008Sum_Bernard.pdf

Bernard E. S. Design of fibre reinforced shotcrete linings with macro-synthetic fibres. (Verkkodokumentti) ECI Conference on Shotcrete for Underground Support XI. Davos, Switzerland, 2009. 5 s. Saatavissa: <http://services.bepress.com/eci/shotcrete/14/>

Cengiz O., Turanli L. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cement and concrete research*, 2003. Vol. 34. s.1357-1364.

Finnsementti Oy. Notkistavat lisäaineet. (Verkkodokumentti) Luettu 22.1.2015. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/lisaaineet/notkistimet>

Geng Y. Micromechanics-based design of frc materials from Microstructural Features to Structural Behavior. Doctoral thesis. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. Massachusetts. 1995.

Guirguis P., Steel Fibre Shotcrete in Tunnelling: State of the Art and Example. (Verkkodokumentti). Englanti, The Massterbuilder – June 2013, 2013. s.97 Saatavissa: <http://www.masterbuilder.co.in/data/edata/Articles/June2013/96.pdf>

Hollmén K. Diplomi-insinööri. Saanio & Riekkola Oy. Helsinki. Haastattelu 13.11.2014, 9.12.2014, 11.1.2015, 19.1.2015.

International federation of structural concrete. Structural Concrete Textbook, Volume 3 (Verkkodokumentti) Sveitsi, Bulletin 53: Structural Concrete - Textbook on behaviour, design and performance, 2010. Vol. 3. s.88 Saatavissa: <http://www.fib-international.org/structural-concrete-textbook-volume-3>

Kaivannaisteollisuusyhdistys ry, Opetushallitus. Kaivos- ja louhintatekniikka. Vammala, Suomi: Vammalan Kirjapaino Oy, 2009. 388 s.

Kokko M. Kalliorakentamisen asiantuntija. Saanio & Riekkola Oy. Helsinki. Haastattelu 20.11.2014.

Lambrechts A. N. Concrete for a new world, the technical performance of steel and polymer based fibre concrete. The institute of concrete technology, annual technical symposium, 2005.

Malmgren L., Nordlund E., Rolund S. Adhesion strength and shrinkage of shotcrete. [Verkkodokumentti] Tunneling and Underground Space Technology, 2004. Vol. 20. S. 33-48. Saatavissa: www.sciencedirect.com

Mäkelä O. Kalliorakenteiden käsinlaskenta. Opinnäytetyö Teknillinen korkeakoulu, materiaalitekniikan osasto. Espoo 2007

Pöllä J. Ruiskubetoni ja sen käyttö kallion lujittamisessa. Tiedotteita, Geotekniikan laboratorio; 915. VTT, Espoo. 1988 s.170.

Salo O. Muovikuituruiskubetoni kalliolujituksessa. Opinnäytetyö Aalto Yliopisto, rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. Espoo 2010.

Salo O. Diplomi-insinööri. Saanio & Riekkola Oy. Helsinki. Haastattelu 11.12.2014, 22.12.2014, 13.1.2015.

SFS 5975 Betonirakenteiden toteutus. Standardin SFS-EN 13670 käyttö Suomessa. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2011.

SFS 7022 Betoni. Standardin SFS-EN 206-1 käyttö suomessa. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2011.

SFS-EN-206-1 Betoni. Osa 1: Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2001.

SFS-EN 12350-1 Tuoreen betonin testaus. Osa 1: Näytteenotto. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2009.

SFS-EN 12350-2 Tuoreen betonin testaus. Osa 2: Painuma. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2009.

SFS-EN 12390-1 Kovettuneen betonin testaus. Osa 1: Muoto, mitat ja muut koekappaleiden ja muottien vaatimukset. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2013.

SFS-EN 12390-2 Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2009.

SFS-EN 12390-3 Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2011.

SFS-EN 12390-4 Kovettuneen betonin testaus. Osa 4: Puristuslujuus. Vaatimukset testauskoneille. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2000.

SFS-EN 12390-7 Kovettuneen betonin testaus. Osa 7: Kovettuneen betonin tiheys. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2009.

SFS-EN 12390-8 Kovettuneen betonin testaus. Osa 8: Paineellisen veden tunkeumasyyvyys. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2009.

SFS-EN 13670 Betonirakenteiden toteuttaminen. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2010.

SFS-EN 14487-1 Ruiskubetoni. Osa 1: Määritelmät, vaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2013.

SFS-EN 14487-2 Ruiskubetoni. Osa 2: Toteuttaminen. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2007.

SFS-EN 14488-1 Ruiskubetonin testaus. Osa 1: Tuoreen ja kovettuneen betonin näytteenotto. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2005.

SFS-EN 14488-4 + A1 Ruiskubetonin testaus. Osa 4: Tartuntalujuus porattujen lieriöiden suoralla vetokokeella. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2008.

SFS-EN 14488-5 Testing sprayed concrete. Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2007.

SFS-EN 14488-7 Testing sprayed concrete. Part 7: Fibre content of fibre reinforced concrete. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2007.

Suojoki M. UV-valon ja lämmön vaikutukset polyolefiineihin. Opinnäytetyö Lahden Ammattikorkeakoulu, muovitekniikan koulutusohjelma. Lahti 2006.

Suomen betoniyhdistys r.y.. BY50 Betoninormit 2012. Neljäs painos, Suomi 2011

Suomen betoniyhdistys r.y.. BY63 Ruiskubetoniohjeet 2014. Ensimmäinen painos, Suomi 2015

Suomen betoniyhdistys r.y.. BY201 Betonitekniikan oppikirja 2004. Viides painos, Jyväskylä, Suomi: Gummerus Kirjapaino Oy, 2005. s. 570.

Wimpenny D., Angerer W., Cooper T. ja Bernard E. S. The use of Steel and Synthetic Fibres in Concrete under Extreme Conditions. (Verkkodokumentti). Englanti, The Masterbuilder – July 2013, 2013. s. 232-238 Saatavissa: <http://www.masterbuilder.co.in/data/edata/Articles/July2013/232.pdf>

Zhihong Z., Feldman D. Synthetic fibre-reinforced concrete. Prog. Polym. Sci, 1995. Vol. 20. s. 185-210.

