Tampereen yliopisto

Repekka Kovanen

VETYHAURASTUMINEN BETONITERÄKSESSÄ

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Repekka Kovanen: Vetyhaurastuminen betoniteräksessä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikka
Huhtikuu 2020

Vetyhaurastumisella tarkoitetaan vedyn vaikutuksesta tapahtuvaa sitkeyden menetystä, joka voi johtaa makroskooppisella tasolla haurasmurtumaa muistuttavaan murtumaan. Teräsbetoni puolestaan on rakennuksissa käytettävä hybridimateriaali, jossa teräsraudoitteet vastaanottavat suurimman osan rakenteeseen kohdistuvista vetävistä jännityksistä. Tämä tutkimus on kirjallisuuskatsaus, joka käsittelee vetyhaurastumista betoniteräksessä. Työn tarkoitus oli selvittää, miten vetyhaurastuminen vaikuttaa teräsbetonirakenteiden suunnitteluun, ja millä keinoilla vetyhaurastumista kannattaa välttää.

Tutkimusaineisto koostuu kirjalähteistä, vertaisarvioiduista tieteellisistä artikkeleista ja standardeista. Ensimmäisissä luvuissa esitellään vetyhaurastumisen teoriaa ja perustietoa raudoitusteräksistä. Viimeisessä käsittelyluvussa tarkastellaan keinoja, joilla vetyhaurastumista voidaan estää käytännössä.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella selvisi, että vetyhaurastumisriski tulee ottaa huomioon esijännitetyn betonin suunnittelussa. Esijännitetyssä betonissa teräsjänne puristaa betonia kasaan, minkä vuoksi betoni kestää raskaampia kuormia ja on tiiviimpää. Vetyhaurastumisriski tulee ottaa huomioon, sillä jänneteräksen vetyhaurastuminen voi johtaa koko rakennelman hajoamiseen. Lisäksi tutkimuksen perusteella havaittiin, että teräsjänteen vetyhaurastumisriskiä voidaan laskea valitsemalla oikeanlainen materiaali, hallitsemalla valmistusvaiheessa vetomuottien geometriaa ja lämpökäsittelylämpötiloja ja käyttämällä katodisessa suojauksessa tarvittavan suuria teräksen sähköisiä potentiaaleja. Työssä esitellään jänneteräksiksi soveltuvat materiaalit ja eritellään, miksi ja miten valmistusmenetelmät ja katodinen suojaus vaikuttavat vetyhaurastumisriskiin.

Avainsanat: vetyhaurastuminen, betoniteräs, esijännitetty betoni, jänneteräs

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. VETYHAURASTUMISEN TEORIAA 2
2.1 Vedyn sijainti teräshilassa 2
2.2 Vetyatomien liike metallihilassa 3
2.3 Vedyn vaikutukset teräksen materiaaliominaisuuksiin 4
2.4 Vetymurtuma 5
2.5 Vetymurtuman tunnistaminen 6
3. BETONITERÄS 7
3.1 Betoniterästyypit 7
3.2 Esijännitetyt teräsbetonirakenteet 7
3.3 Jänneterästen valmistus 10
3.4 Olosuhteet 10
3.5 FIP- ja DIBt-testit 10
4. VETYHAURASTUMISEN ESTÄMINEN 12
4.1 Materiaalivalinta 12
4.1.1 Eutektoidinen teräs 12
4.1.2 Ruostumaton teräs 13
4.2 Valmistus 15
4.3 Katodinen suojaus 18
5. YHTEENVETO 21
LÄHTEET 23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

α-teräs	ferriittinen teräs
γ-teräs	austeniittinen teräs
AIDE	engl. adsorption-induced dislocation emission, adsorption indusoima dislokaatioemissio
FIP-testi	ransk. Fédération Internationale de la Précontrainte -testi, kansainvälisen esijännitysfederaation testi vetyhaurastumisherkkyydelle
DIBt-testi	saks. Deutsches Institut für Bautechnik -testi, saksalaisen rakennustekniikan instituutin testi vetyhaurastumisherkkyydelle
HEDE	engl. hydrogen-enhanced decohesion, vedyn indusoima dekoheesio
HELP	eng. hydrogen-enhanced localized plasticity, vedyn indusoima plastisuus
$\mathrm{m}-\%$	massaprosentti
tkk	tilakeskeinen kuutiollinen yksikkökoppirakenne
pkk	pintakeskeinen kuutiollinen yksikkökoppirakenne
SEM	engl. scanning electron microscope, pyyhkäisyelektronimikroskooppi
J_∞	vuo
D_H	diffuusiokerroin
C	konsentraatio
$E_{eq,H}$	vedyn liukenemisen sähköinen tasapainopotentiaali

1. JOHDANTO

Teräsbetoni on rakennuksissa käytettävä hybridimateriaali, joka koostuu betonista ja sitä lujittavista raudoitusterästangoista. Materiaalia on käytetty jo lähes 200 vuoden ajan, sillä se sopii suurten ja raskaiden rakennelmien valmistukseen lujittamatonta betonia paremmin. Koska betonin vetolujuus on matala, siitä valmistetut rakenteet alkavat murentua nopeasti, jos niihin kohdistuu vetorasituksia. Teräsraudoitteilla on korkea vetojäykkyys, joten ne vastaanottavat suurimman osan teräsbetonirakenteeseen kohdistuvasta vetävästä kuormituksesta. Esijännitetyssä betonissa teräsjänteet puristavat betonia kasaan luoden betoniin puristusjännityksen, mikä mahdollistaa rakenteelle vielä suurempien vetävien kuormitusten keston.

Raudoitusteräksen kestävyys on merkittävä seikka erityisesti esijännitettyjen rakenteiden kohdalla. Mikäli teräksen materiaaliominaisuudet eivät vastaa odotuksia, koko rakenne voi hajota käyttökuormitusten vuoksi. Monet asiat kuten korroosio ja vetyhaurastuminen voivat heikentää betoniteräksen mekaanisia materiaaliominaisuuksia. Vetyhaurastumisella tarkoitetaan vedyn vaikutuksesta tapahtuvaa haurastumista, joka voi johtaa vetymurtumaan, joka muistuttaa makroskooppisella tasolla haurasmurtumaa. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan vetyhaurastumista betoniteräksessä.

Opinnäytetyön tavoite on vastata seuraaviin kysymyksiin: Miten vetyhaurastuminen vaikuttaa teräsbetonirakenteiden suunnitteluun, ja millä keinoilla vetyhaurastumista voidaan välttää? Toisessa luvussa käydään läpi perustietoa vetyhaurastumisen teoriasta. Luvussa selvitetään, missä vetyatomit sijaitsevat teräshilassa, miten ne liikkuvat ja miten ne vaikuttavat terästen materiaaliominaisuuksiin. Luvun lopussa tutkitaan, kuinka vedyn aiheuttama murtuma voidaan tunnistaa. Kolmannessa luvussa kerrotaan teräsbetonista materiaalina. Viimeisessä luvussa selvitetään, mikä altistaa teräsraudoitteet vetyhaurastumiselle, ja miten vetyhaurastumista voidaan välttää.

2. VETYHAURASTUMISEN TEORIAA

Vetyhaurastumisella tai vetyhauraudella tarkoitetaan materiaalin kemiallista haurastumista vedyn vaikutuksesta. Pienenä molekyylinä vety pääsee diffuntoitumaan hilarakenteen sisään välisija-atomiksi suhteellisen helposti. Vedyn läsnäolon välttäminen terästuotteiden valmistamisvaiheessa on oleellista, sillä valmiin terästuotteen sisältämää vetyä voi olla lähes mahdoton havaita ainetta vahingoittamattomilla tutkimusmenetelmillä. Vedylle herkillä teräksillä tämä voi johtaa viivästyneeseen murtumaan.

2.1 Vedyn sijainti teräshilassa

Ympäristön vetykaasu päätyy betoniteräkseen absorboitumalla teräksen pinnalla. Reaktioyhtälö $\frac{1}{2}H_2(g) \rightleftharpoons H(s)$ kuvaa vetykaasun $H_2(g)$ liukenemista kiinteään liuokseen $H(s)$. Sekä puhtaan raudan että teräksen tapauksessa reaktio on endoterminen eli se ei tapahdu spontaanisti vaan vaatii ulkopuolista työtä tapahtuakseen. Reaktiota varten tarvittavaa ulkoisen energian määrää voidaan ennustaa vedyn liukoisuuden perusteella. Mitä korkeampi vedyn liukoisuus on, sitä vähemmän energiaa reaktio vaatii. [1, s. 1–3]

Vedyn liukoisuutta teräkseen kuvataan liuenneen vedyn konsentraatiolla. Se kasvaa lämpötilan ja atmosfäärin vetykaasun osapaineen kasvaessa. Se on myös riippuvainen teräksen hilarakenteesta niin, että tilakeskisillä kuutiollisilla (tkk) ferriittisillä (α-teräs) ja pintakeskisillä kuutiollisilla (pkk) austeniittisilla (γ-teräs) teräksillä on eri vedyn liukoisuudet. Huoneenlämmössä liukoisuudet ovat hyvin matalia sekä α- että γ-teräksille, mikäli niitä arvioidaan täydellisille teräshiloille. Todelliset vetykonsentraatiot ovat liukoisuuksien perusteella ennustettuja konsentraatioita suurempia, sillä teräshilat sisältävät aina virheitä, kuten dislokaatioita, joihin vetyä voi sitoutua lisää. Teräkseen liuennut vety jaotellaan usein kiinteänä liuoksena atomihilan välisijoihin sitoutuneeseen ja hilavirheisiin sitoutuneeseen vetyyn. [1, s. 1–4]

Hilavirheisiin sitoutuneen vedyn potentiaalienergia on usein matalampi kuin atomivälei-hin sitoutuneen [1, s. 35]. Vetyatomit sitoutuvat ensin näihin paikkoihin, sillä ne pyrkivät matalaenergiseen tilaan. Plastista muodonmuutosta kokenut teräs sisältää muokkaamatonta terästä suuremman määrän hilavirheitä, erityisesti dislokaatioita. Tämän vuoksi muokattu teräs sisältää muokkaamatonta terästä enemmän vetyä. Dislokaatiot ovat merkittävässä asemassa niin vedyn sitoutumisen kuin myös liikkeen kannalta. Hirthin et al. [2, s. 131–133] ja Lun et al. [3] mukaan vety sitoutuu dislokaatioihin niiden

jännityskenttien vaikutuksesta. Särmädislokaatio aiheuttaa hilaan veto-, puristus- ja leikkausjännityksiä. Ruuvidislokaatio puolestaan aiheuttaa vain leikkausjännitystä. Vetyä sitoutuu särmädislokaatioihin enimmäkseen niiden aiheuttamien vetojännitysten vuoksi. Vetävät jännitykset vääristävät hilaa paikallisesti niin, että vedylle on enemmän tilaa atomiväleissä. Leikkausjännityskentät sitovat vetyä heikommin, sillä ne vaikuttavat vain pienellä alueella dislokaation ympärillä.

Dislokaatioiden lisäksi vety voi sitoutua lujitepartikkeleihin, vakansseihin, liuosatomeihin, raerajoihin ja sisäisten säröjen ja onkaloiden pintoihin [1, s. 35–60], [2, s. 137–138]. Osa vetyä sitovista alueista, esimerkiksi dislokaatiot, sitovat vetyä niin suurilla sidosenergioilla, että vetyatomien todennäköisyys irrota niistä laskee lähelle nollaa. Nämä alueet täyttyvät vedyllä jo matalissa vetykonsentraatioissa, minkä jälkeen vetyä voi sitoutua muualle rakenteeseen [4]. Tästä seuraa, että vedyn liukoisuus kasvaa, kun dislokaatioiden ja muiden voimakkaasti vetyä sitovien alueiden määrä kasvaa.

2.2 Vetyatomien liike metallihilassa

Vetyatomit voivat liikkua metallin läpi kahdella tavalla: diffuusiolla ja dislokaatioiden mukana. Vedyn diffuusio on liuenneiden vetyatomien siirtymistä metallihilassa matalamman konsentraation suuntaan. Tätä voidaan teoriassa kuvailla ensimmäisellä Fickin lailla

$$J_\infty = -D_H \frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}x},$$

missä J_∞ on vedyn vuo, D_H diffuusiokerroin ja C vedyn konsentraatio. Täydellisessä metallihilassa vetyatomit sijaitsevat tetraedrisissä (T-välisijat) tai oktaedrisissa (O-välisijat) yksikkökopin välisijoissa ja voivat diffuusion vaikutuksesta siirtyä välitilasta toiseen. Diffuusiokerroin D_H riippuu lämpötilasta, paineesta sekä teräksen hilarakenteesta. [1, s. 11, 65]

Chen et al. [5] tutkivat vedyn diffuusioreittejä virheettömissä rautahiloissa ja totesivat, että vety liikkuu tkk-rautahilassa T-välisijasta toiseen ja tiivispakkautuneessa pkk-rautahilassa T- ja O-välisijojen välillä. He myös selvittivät vedyn diffuusiokertoimet näissä hiloissa, ja totesivat vedyn diffuusion olevan voimakkaampaa tkk- kuin pkk-raudassa. Vedyn diffuusiota tapahtuu enemmän α- kuin γ-teräksissä, sillä vety sitoutuu heikommin α-teräksen atomivälisijoihin [1, s. 65]. Heikomman sitoutumisen vuoksi atomin siirtymisen aktivointiin vaaditaan vähemmän energiaa.

Käytännön teräksissä vetyatomit sitoutuvat myös erilaisiin hilavirheisiin, kuten alaluvussa 2.1 kerrottiin. Mikäli vedyllä on korkea sidosenergia hilavirheiden kanssa, sen

diffuntoituminen takaisin atomiväleihin käy epätodennäköisemmäksi [6]. Plastinen muokkaantuminen lisää hilavirheiden, kuten dislokaatioiden, sisäisten säröjen ja vakanssien, määrää. Näistä kaikki kykenevät sitomaan vetyä, mikä heikentää vedyn diffuusiota, mutta parantaa sen liukoisuutta. Vedyn on myös havaittu edistävän hilavirheiden, erityisesti vakanssien, muodostumista [1, s. 51–56], [7]. Koska teräshila sisältää useita erilaisia hilavirheitä, ei ole täysin varmaa, kuinka suuri osa vedyn liikkeestä tapahtuu nimenomaan dislokaatioiden mukana, mutta niiden vaikutuksen arvellaan olevan merkittävä [1, s. 35].

2.3 Vedyn vaikutukset teräksen materiaaliominaisuuksiin

Vety, kuten muutkin liuosatomit, vaikuttavat teräksen materiaaliominaisuuksiin, sillä liuosatomit muuttavat yksikkökopin dimensioita, vääristävät sen muotoa ja aiheuttavat erinäisiä jännityksiä. Tätä tapahtuu riippumatta siitä, sijaitseeko liuosatomi atomivälisijassa vai korvaako se yksikkökopin emoatomin. Vaikutusten suuruusluokat vaihtelevat ominaisuuksittain. Elastiset moduulit, kuten esimerkiksi kimmomoduuli E, liukumoduuli G ja bulkkimoduuli K, kuvaavat materiaalin elastista käyttäytymistä, ja vedyn läsnäolo ei muuta niitä merkittävästi [1, s. 79]. Tämä johtuu siitä, että huoneenlämmössä vetyä liukenee teräkseen vain pieniä määriä, kuten alaluvussa 2.1 todettiin. Terästen tapauksessa vedyn on todettu pienentävän elastisia moduuleja, mutta havaitut suhteelliset muutokset ovat olleet alle $1\ \%$:n luokkaa [1, s. 79], [8].

Vedyn vaikutus myötölujuuteen on tällä hetkellä kiistanalainen asia. Kain et al. [9] tutkivat vedyn vaikutuksia 13 massaprosenttia ($\mathrm{m} - \%$) kromia sisältävään ruostumattomaan martensiittiseen teräkseen ja totesivat, ettei myötölujuus muuttunut, jos vetykyllästäminen tehtiin ennen vetokoetta, mutta heikkeni, jos kyllästämistä jatkettiin kokeen ajan. Muissa tutkimuksissa on todettu myötölujuuden heikentymistä myös esikyllästetyillä näytteillä [10], [11]. Aiheen tutkiminen on haasteellista, sillä hyvien tulosten tuottaminen vaatii hyvin monien seikkojen hallintaa. Näistä esimerkkejä ovat tutkitun teräs- tai rautanäytteen koostumus ja puhtaus, raekoko, testauslämpötila, valittu testi ja näytteen vetykyllästysmetodi [1, s. 85]. Ajankohtaisten tutkimustulosten perusteella [9], [10], [11] vaikuttaa kuitenkin siltä, että vedyn voi todeta heikentävän myötölujuutta. Plastisen muodonmuutoksen alueella vedyn on havaittu heikentävän teräksen sitkeyttä eli kykyä kestää plastista muodonmuutosta [9], [11].

Raudoitusteräs ei yleensä koe jännityksiä, jotka ovat lähellä sen myötölujuutta. Vedyn vaikutus jännitysrelaksaation tapahtumiseen jänneteräksissä on oleellisempi asia, kun tarkastellaan vedyn vaikutuksia betoniteräksessä. Jännitysrelaksaatiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa vakiovenymän ylläpitämiseen vaadittava ulkoinen jännitys pienenee ajan

funktiona dislokaatioliikkeen vaikutuksesta [1, s. 87]. Jännitysrelaksaatio johtaa lopulta teräsbetonin murtumaan. Vedyn on todettu nopeuttavan jännitysrelaksaatiota [12], [13]. Astafurova et al. [12] tutkivat vedyn ja orientaation vaikutuksia teräksen erilliskiteiden jännitysrelaksaatioon. Vedyn todettiin nopeuttavan dislokaatioliikkeen aiheuttamaa jännitysrelaksaatiota. Myös Hashimoto et al. [13] totesivat vedyn edistävän jännitysrelaksaatiota raudalla ja Fe-8Cr ja F82H teräksillä.

2.4 Vetymurtuma

Terästen murtumiskäyttäytymisen oletetaan olevan sitkeää. Vetyhaurastuminen johtaa haurasmurtumaan, millä voi teräsrakenteissa olla katastrofaaliset lopputulokset. Vedyn edistämälle haurasmurtumalle on esitetty useita eri mekanismeja, joista tarkastellussa lähdekirjallisuudessa useimmin mainitut esitellään tässä luvussa. Alaluvussa keskitytään nimenomaan aiemmin teräkseen liuenneen sisäisen vedyn aiheuttamaan vetyhaurastumiseen, sillä raudoitusteräkset ovat harvoin ympäristössä, joka sisältää suuren määrän vetyä. Materiaalin vetymurtumaherkkyys riippuu materiaalin mikrorakenteesta. Herkkyyttä kuvataan sillä, kuinka suuri konsentraatio liuennutta vetyä materiaalissa on ennen kuin vetymurtumia alkaa ilmaantua. Lujat martensiittiset teräkset ovat hyvin herkkiä vetyhauraudelle, α-teräkset kestävät niihin verrattuna yli kymmenkertaisen määrän sisäistä vetyä [14, s. 92]. Haurasmurtuman oletetaan lähtevän liikkeelle hilassa valmiiksi olevista säröistä, joiden oletetaan sijaitsevan useimmiten raerajojen, erkaumien ja muiden pintojen läheisyydessä [14, s. 93-94].

Ensimmäinen esiteltävistä hypoteeseista vetymurtumamekanismiksi on HEDE (Hydrogen-Enhanced DEcohesion) eli vedyn indusoima dekoheesio [15, katso 14, s. 101–103]. Tämän hypoteesin mukaan teräksen sisäiset säröt lähtevät etenemään, koska niiden teräviä päitä ympäröiviin alueisiin kertyy suuri määrä vetyatomeita, jotka heikentävät hilan koheesiota. Tämän vaikutuksesta alueille muodostuu mikroskooppisia säröjä, jotka yhtyvät makroskooppiseen sisäiseen säröön, jolloin haurasmurtuma pääsee etenemään. Tämän mekanismin mukaan vetymurtuma etenee täysin hauraasti, mutta muut esiteltävät mekanismit sisältävät myös sitkeää murtumista.

Toinen mahdollinen mekanismi on HELP (Hydrogen-Enhanced Localized Plasticity) eli vedyn indusoima plastisuus [16, katso 14, s.103–106]. Tämän teorian mukaan vedyn läsnäolo lisää dislokaatioliikettä sisäisen särön läheisyydessä, missä vetyä enemmän kuin muualla teräshilassa. Dislokaatioliikkeen vaikutuksesta ympäristöön ydintyy mikroskooppisia onkaloita, jotka yhdistyvät särön kanssa saavutettuaan riittävän suuren

koon. HELP-mekanismin vaikutuksesta syntyvä murtopinta on mikroskooppisella tasolla kuoppainen, mutta makroskooppisella tasolla tämän tyyppinen murtuma muistuttaa haurasmurtumaa.

Kolmas teoria on AIDE (Adsorption-Induced Dislocation Emission) eli adsorption indusoima dislokaatioemissio [17, katso 14, s. 106–112]. Tämän teorian mukaan vetyä adsorptoituu säröjen kärkiin, minkä myötä kärjistä lähtee tavallista suurempi määrä dislokaatioita ympäröivään hilaan. Vedyn adsorptoituminen särön kärkeen heikentää materiaalin lokaalia koheesiota. Tämä johtaa dislokaatioiden emittoitumiseen särön kärjestä. Lisääntynyt dislokaatiotiheys alueella aiheuttaa onkaloiden ydintymistä, minkä takia murtuma pääsee etenemään onkaloiden yhdistyessä. AIDE:n mukaan dislokaatiot eivät kuitenkaan liiku nopeammin vedyn vaikutuksesta kuten HELP-mekanismissa, vaan niiden tiheyden lokaali kasvu johtaa särön leviämiseen.

Tällä hetkellä ei ole täyttä varmuutta siitä, mitkä mekanismeista ovat eniten vastuussa vetymurtumista. Vetykonsentraation on havaittu olevan suurempi mm. raerajoilla ja erkaumilla, mikä tukee sekä HEDE- että AIDE-teoriaa [14, s. 109]. Toisaalta liuenneen vedyn läsnäolon on todettu pehmittävän teräsmateriaaleja, mikä tukee HELP-teoriaa [14, s. 104]. Sen, mikä mekanismi on käytössä, uskotaan riippuvan teräksen mikrorakenteesta [18]. Useampi mekanismi voi myös olla käytössä samaan aikaan [14, s. 112–113].

2.5 Vetymurtuman tunnistaminen

Tämän opinnäytetyön yksi tutkimuskysymys on, miten vetyhauraus vaikuttaa teräsbetonirakenteisiin. Tähän kysymykseen on haasteellista vastata, sillä vetymurtuman tunnistaminen ei ole helppoa. Raudoitusteräkset kokevat monenlaisia kuormituksia elinkaarensa aikana ja rakenteiden murtuminen on usein monisyinen tapahtuma. Murtumia voivat vetyhaurastumisen lisäksi aiheuttaa mekaaninen väsyminen, korroosioväsyminen tai jännityskorroosio. Vetymurtumia on usein vaikea erottaa muista murtumatyypeistä. Tämän vuoksi on vaikeaa esittää arvioita siitä, kuinka suuri osa betoniterästen murtumista on vedyn aiheuttamia.

Vetymurtuman murtopinnan mikroskooppinen muoto riippuu siitä, kuinka paljon plastista muodonmuutosta murtuman ympärillä on tapahtunut. Mitä hauraampi murtuma on ollut kyseessä, sitä teräväreunaisempi murtopinta on (HEDE). Mikäli plastista muodonmuutosta on tapahtunut murtuman etenemisen yhteydessä (HELP ja AIDE), murtopinta on mikroskooppisella tasolla kuoppainen. [14, s. 101–112]

3. BETONITERÄS

Betoniteräksellä tarkoitetaan betonisten rakenteiden raudoittamisessa käytettyä terästä. Teräsraudoitus vahvistaa betonista rakennetta ja mahdollistaa suurten rakenteiden valmistamisen. Betonilla itsellään on hyvä puristuslujuus mutta sen vetolujuus on vain noin 10 % puristuslujuudesta. Tämän vuoksi betoni murenee helposti vetokuormitusten vaikutuksesta. Teräksen tärkein materiaaliominaisuus betonirakenteen vahvistusta ajatellen on sen vetojäykkyys. Kun teräsbetonista valmistettua rakenneosaa kuormitetaan, teräsraudoitteet vastaanottavat suurimman osan vetokuormituksista ja betoni vastaanottaa suurimman osan puristuskuormituksista.

3.1 Betoniterästyypit

Betoniteräkset jaetaan yleensä kolmeen luokkaan: tankoihin, verkkoihin ja jänneteräksiin. Tangot ovat ympyräpoikkileikkauksellisia ja niiden pinta voi olla kuvioitu, jolloin kyseessä on harjatanko, tai tasainen, jolloin kyseessä on sileä tanko. Verkot ovat koneellisesti hitsaamalla valmistettuja teräsruudukkoja. [19, s. 72–74] Tangot ja verkot eivät tyypillisesti ole alttiita vetyhaurastumiselle, sillä niissä ei käyttötilanteessa ole suuria sisäisiä jännityksiä.

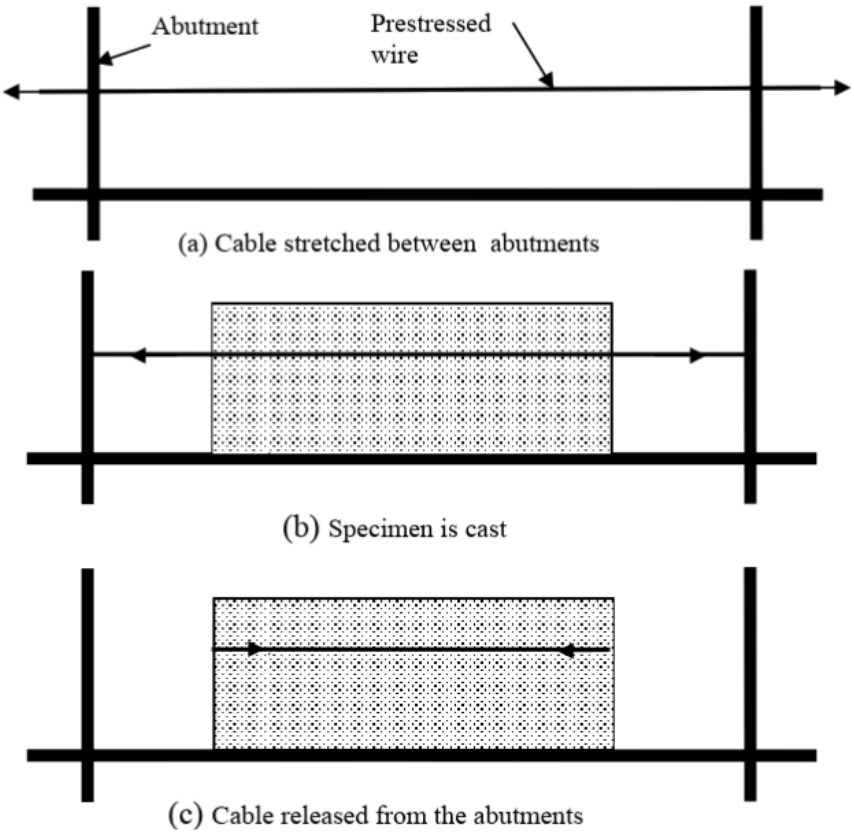
Esijännitetyssä betonissa käytetään yksittäisiä teräsjänteitä tai teräsjänteistä punottuja nippuja, jotka puristavat betonia kasaan. Näiden jänteiden materiaalina käytetään lujempaa terästä kuin tavallisissa raudoitusteräksissä. [19, s. 74] Vetyhaurastumisen kannalta juuri jänneteräksiä on syytä tarkastella, sillä niihin syntyy valmistusvaiheessa plastisia muodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä, jotka altistavat niitä vetyhaurastumiselle [20]. Lisäksi jännitysrelaksaatio tehostuu vedyn vaikutuksesta [12], kuten alaluvussa 1.3 todettiin.

3.2 Esijännitetyt teräsbetonirakenteet

Esijännitetyssä betonissa jänne aiheuttaa betoniin puristavan sisäisen jännityksen, jonka vaikutuksesta betoniin käytössä kohdistuvat vetojännitykset pienenevät. Tämä parantaa betonin murtumisenkestoa, pienentää muodonmuutoksia ja tiivistää betonia. Esijännitettyä betonia voidaan käyttää esimerkiksi siltojen ja vesitornien valmistuksessa, sillä se on tavallista teräsbetonia vesitiiviimpää. Sen käyttöikä on pidempi kuin

tavallisella teräsbetonilla ja se vaatii vähemmän huoltoa. Tämä tekee siitä taloudellisesti järkevän materiaalivalinnan rakenteille, jotka esimerkiksi kokevat suuria kuormituksia käyttöikänsä aikana tai sijaitsevat kosteassa ympäristössä. [21, s. 591–594]

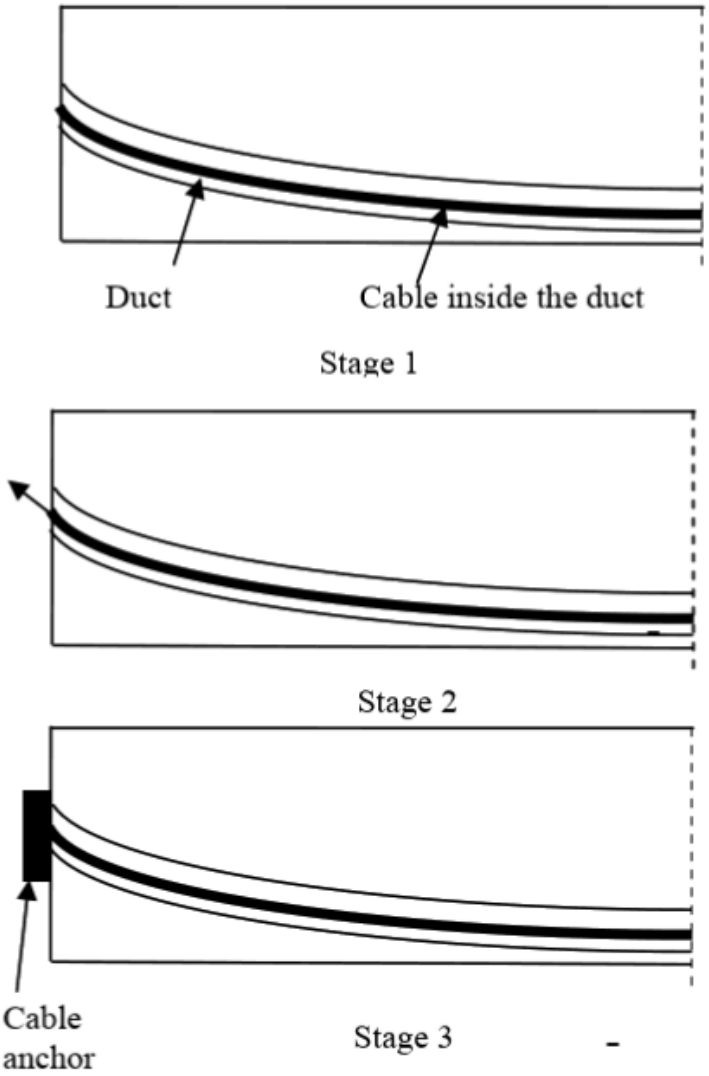
Betonirakenteiden valmistuksessa käytetään kahta eri metodia: paikallavalua ja elementtivalua. Paikallavalu tapahtuu siellä, missä valmistettava rakennelma tulee sijaitsemaan ja elementtivalu tapahtuu yleensä tehtaalla. Teräsjänteet voidaan jännittää joko ennen betonin valamista, eli esijännittää, tai betonin valamisen jälkeen, eli jälkijännittää. Kuvassa 1 on esitetty esijännitys vaiheittain. Aluksi betoni valetaan jännitettyjen jänteiden ympärille, minkä jälkeen sen annetaan kovettua. Kovettuessaan betoni tarttuu jänteiden pintaan. Kun betoni on kovettunut, jänteet vapautetaan ja leikataan haluttuun mittaan. [21, s. 593] Esijännitys on yleisesti käytetty jännitysmenetelmä esijännitetyn betonin elementtivalussa.



Kuva 1. *Esijännityksen vaiheet: a) Jänne jännitetään. b) Betoni valetaan ja sen annetaan kovettua. c) Jänne vapautetaan ja katkaistaan halutun pituiseksi. [22, s. 9]*

Jälkijännityksen tapauksessa betonin annetaan kovettua ennen jänteiden jännittämistä. Kuvassa 2 on esitetty jälkijännittämisen vaiheet. Tätä menetelmää käytetään yleensä paikallavalussa. Kovettuva betoni sisältää kanavat jännenippuja varten. Kun betoni on

kovettunut, jänteet vedetään kanavien läpi, jännitetään ja kiinnitetään ulkopuolisiin ankkurilevyihin. Jälkijännitetyt jänteet suojataan usein metallisella tai muovisella putkella. [21, s. 594–595]



Kuva 2. *Jälkijännittämisen vaiheet: 1) Betoni valetaan ja sen annetaan kovettua niin, ettei betoni tartu jänteeseen. 2) Jänne jännitetään. 3) Jänne ankkuroidaan betonin ulkopuoliseen ankkurilevyyn. [22, s. 16]*

Esijännitetyn betonin hyvät materiaaliominaisuudet huononevat ajan myötä. Iso syy tähän on sisäisen jännityksen menetys. Tätä tapahtuu väistämättä useasta syystä, joita ovat esimerkiksi betonin kutistuminen, teräsjänteiden viruminen tai relaksaatio ja ankkurilevyjen luisuminen. [21, s. 604]

3.3 Jänneterästen valmistus

Jänneteräs valmistetaan tavallista raudoitusterästä lujemmista materiaaleista. Käytettävien terästen tulee lisäksi kestää jännityksessä syntyvät muodonmuutokset, vastustaa relaksaatiota ja vastustaa jännityskorroosiota. Jänneteräkset valmistetaan kuumavalssatusta teräksestä kylmävetämällä [23], mikä tuottaa niille suuren lujuuden. Kylmävetäminen kasvattaa teräksen lujuutta muokkauslujittamalla sitä ja tuottamalla tekstuuria. Kylmävetämisen jälkeen tangot lämpökäsitellään [24, s. 39], mikä vähentää vetämisen aiheuttamia jäännösjännityksiä ja pehmentää materiaalia.

Teräspunos valmistetaan kiertämällä ohuita kylmävedettyjä teräsjänteitä hieman paksumman jänteen ympärille. Mikäli betonin sisäinen jännitys tuotetaan jälkijännittämällä, teräspunos on betonin sisällä yleensä muovisessa tai metallisessa suojaputkessa. Suojaputki sisältää öljyä, joka suojaa jänteitä korroosiolta. [21, s. 594–595]

3.4 Olosuhteet

Esijännitettyä betonia käytetään paljon haastavissa olosuhteissa. Rakennelmien on usein kestettävä raskaita kuormia ja pysyttävä tiiviinä. Lisäksi raudoitteet on voitava pitää suojassa korroosiolta. Vetyä päätyy raudoitteille usein samoja reittejä kuin muitakin korrodoivia aineita.

Mitä herkemmin teräsbetoni halkeilee, sitä helpommin sen raudoitteissa alkaa tapahtua korroosiota. Korrodoivat aineet liikkuvat helpommin halkeilleen betonin läpi. Kuten edellä mainittiin, jännitetty betoni on jännittämätöntä betonia tiiviimpää ja kestää paremmin halkeilua. Lisäksi raudoitteita voidaan suojata paremmin korroosiolta lisäämällä betonikerroksen paksuutta tai käyttämällä muita korroosiosuojia. Näitä ovat esimerkiksi betonin ulkopinnan päällystäminen maalilla ja teräksen katodinen suojaus. [24, s. 43–44, 52–53]

3.5 FIP- ja DIBt-testit

Jänneteräksen vetyhaurastumisriskin arviointiin on käytössä kaksi yleistä testiä: FIP-testi (Fédération Internationale de la Précontrainte) [25, katso 26] ja DIBt-testi (Deutsches Institut für Bautechnik) [27, katso 26]. Testit muistuttavat toisiaan: kummassakin näytettä pidetään vakiojännityksessä $50\ °\mathrm{C}$:ssa erilaisissa vesiliuoksissa, kunnes näyte murtuu. FIP-testissä käytetään ammoniumtiosyanaattiliuosta ($20\ \%\ \mathrm{NH_4SCN}, 80\ \%\ \mathrm{H_2O}$). DIBt-testissä puolestaan käytetään neutraalia liuosta, joka sisältää veden lisäksi 0,014 M kaliumkloridia, 0,052 M kaliumsulfaattia ja 0,017 M kaliumtiosyanaattia.

FIP-testi on yleensä paljon lyhyempi kuin DIBt-testi, sillä FIP-testissä käytettävä testiliuos aiheuttaa vetyhaurastumista paljon nopeammin kuin DIBt-testin neutraali liuos. FIP-testi keskeytetään, jos näyte ei murru ensimmäisen 500 tunnin aikana [26], [28]. Näytteen todetaan tällöin vastustavan erittäin hyvin vetyhaurastumista. Jos kylmävedetty jänneteräsnäyte puolestaan kestää FIP-testissä alle 3 tuntia, sen todetaan olevan erittäin herkkä vetyhaurastumiselle [28]. DIBt-testi kestää 2000 tunnin ajan tai kunnes näyte murtuu [28]. Mikäli näyte kestää murtumatta 2000 tuntia, vetyhaurastumisriskin todetaan olevan hyvin matala [28].

Kumpaakin testeistä käytetään vetyhaurastumisriskin arvioinnissa. FIP-testin suurin etu on sen nopeus DIBt-testiin verrattuna. Testiliuos on kuitenkin huomattavasti korrodoivampi kuin jänneteräksen todellinen käyttöympäristö. [28] Tämän vuoksi FIP-testin tuloksista ei voida tehdä tarkkoja johtopäätöksiä todellisesta vetyhaurastumisriskistä. Sitä kannattaa käyttää vain tilanteissa, joissa halutaan tietää, onko teräs erittäin herkkä tai erittäin kestävä vetyhaurastumista ajatellen. DIBt-testi on realistisempi vaihtoehto vetyhaurastumisriskin arviointiin, mutta testin suorittamiseen on varattava paljon aikaa.

4. VETYHAURASTUMISEN ESTÄMINEN

Edellisissä luvuissa on käsitelty vetyhaurastumista ilmiönä ja todettu, että sitä tulisi välttää erityisesti Jänneteräksissä. Tässä luvussa tarkastellaan tarkemmin asioita, jotka altistavat jänneteräksen vetyhaurastumiselle. Näiden merkityksiä arvioidaan, ja pohditaan parhaita tapoja estää vetyhaurastumista.

4.1 Materiaalivalinta

Jänneteräksiltä vaaditaan useita mekaanisia ominaisuuksia kuten korkeaa murtolujuutta ja myötölujuutta sekä hyvää väsymisen kestoa. Jänneteräkset luokitellaan erikoisteräksiksi. Kaupallisissa teräksissä esiintyy erilaisia faaseja kuten ferriittiä, sementiittiä ja austeniittia. Teräksen faasirakenne vaikuttaa sen vetyhaurastumisherkkyyteen, joten yksi keino välttää vetyhaurastumista on valita oikeanlainen materiaali. Alaluvussa 2.2 todettiin vedyn diffuntoituvan nopeammin α- kuin γ-teräksissä, sillä vety sitoutuu voimakkaammin austeniitin atomivälisijoihin. Toisaalta alaluvussa 2.1 vedyn liukoisuuden todettiin olevan matala kumpaankin faasin. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään yleisesti käytettyjen eutektoidisten esijännitysterästen alttiutta vetyhaurastumiselle. Lisäksi käsitellään mahdollisuutta käyttää ruostumattomia teräksiä sovelluskohteessa.

4.1.1 Eutektoidinen teräs

Lähes kaikki jänneteräs valmistetaan kylmävedetyistä eutektoidisista teräksistä, koska ne ovat lujia [29]. Standardin SFS 1265-1:en [23] mukaan kaupallisten jänneterästen murtolujuudet ovat välillä 1570–2160 MPa. Eutektoidinen jänneteräs sisältää noin $0{,}8\ \mathrm{m} - \%$ hiiltä eli se on hypoeutektoidista. Kun hypoeutektoidista terästä viilennetään hitaasti austeniittilämpötilasta, austeniitin raerajoille ydintyy ferriittiä. Kun sulaa viilennetään eutektoidisen lämpötilan alapuolelle, jäljellä oleva austeniitti hajoaa perliitiksi, joka muodostuu lamellisista sementiitistä ja ferriitistä. Teräsjänteet valmistetaan kylmävetämällä. Kylmävedon vaikutuksesta perliittilamellit suuntautuvat jänteen vetoakselin suutaan, jolloin lopullinen mikrorakenne on hyvin anisotropinen [29], [30]. Valmiit jänteet ovat hyvin lujia vetosuuntaan.

Toribio ja Overejo [30] tutkivat kylmävedetyn eutektoidisen teräksen mikrorakennetta. He kuvasivat pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM, Scanning Electrone Microscope) seitsemää näytettä. Näytettä 0 ei ollut kylmävedetty ja näyte 6 oli kokenut eniten vetoa, eli sen poikkileikkauksen halkaisija oli pienin. Toribio ja Overejo havaitsivat, että vetämisen edetessä perliittilamellit ohenivat ja vedon suuntaisen tason perliittittilamellit

orientoituivat vetoakselin suuntaan. Perliittilamellien oheneminen näkyi jo vähän vedettyjen näytteiden SEM-kuvissa, mutta orientoituminen alkoi näkyä vasta enemmän vetoa kokeneissa näytteissä. Tästä voidaan päätellä, että jänteen mikrorakenteen orientoitumisesta aiheutuva vedon suuntainen lujuus on riippuvainen siitä, kuinka paljon vetoa jänne on kokenut valmistusvaiheessa.

Eutektoidisen teräksen vetyhaurastumismekanismeja on tutkittu [29], [31], ja vedyn on todettu olevan haitallista erityisesti tällaisen teräksen sitkeydelle. Enos ja Scully [29] tutkivat eutektoidisen teräksen vetykonsentraation vaikutusta sen sitkeyteen. He totesivat, että kasvava vetykonsentraatio pienentää materiaalin sitkeyttä sekä lokaalisti että globaalisti. He arvioivat, että tkk-rakenteen atomivälisijoihin heikosti sitoutunut vety heikentää materiaalia joko lisäämällä ferriitin ja sementiitin rajapinnan dekoheesiota, helpottamalla dislokaatioiden liukumista tai aiheuttamalla mikroskooppisten onkaloiden muodostumista. [29]

Myös Sanchez et al. [31] totesivat vedyn heikentävän eutektoidisen teräksen sitkeyttä. Heidän tutkimuksessaan vetykyllästettyjen kylmävedettyjen terästen murtovenymät olivat lähes puolet kyllästämättömiä vertailunäytteitä pienemmät. Vetykonsentraation kasvattaminen ei kuitenkaan merkittävästi laskenut teräksen myötö- tai murtolujuutta. [31]

Eutektoidisen teräksen sitkeys laskee vetykonsentraation kasvaessa. Vety diffuntoituu kuitenkin huonosti eutektoidisessa teräksessä, sillä sementiittilamellit toimivat esteenä diffuusiolle [29].

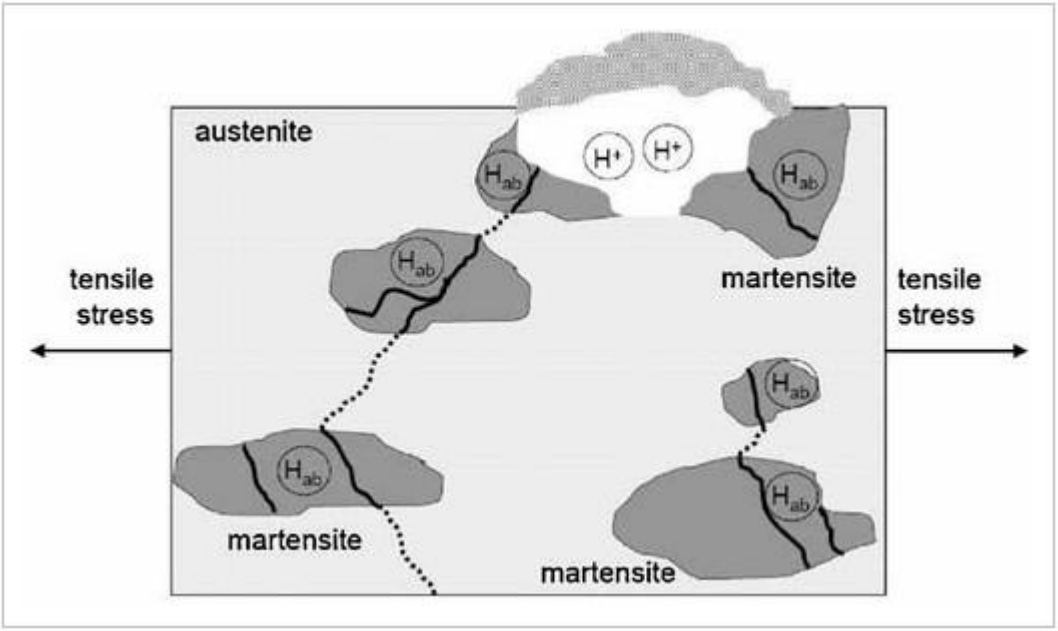
4.1.2 Ruostumaton teräs

Koska eutektoidinen teräs kestää huonosti korrodoivia ympäristöjä, ruostumattomien terästen käyttöä jänneteräksinä on ehdotettu [32], [33]. Teräs voidaan määritellä ruostumattomaksi, jos se sisältää yli $11{,}5\ \mathrm{m}-\%$ kromia. Kromi parantaa teräksen korroosionkestävyyttä, sillä kromipitoisen teräksen pinnalle muodostuva oksidikerros suojaa korroosiolta paremmin kuin seostamattoman teräksen oksidikerros. Korroosionkestoa voidaan parantaa edelleen lisäämällä kromia tai muita seosaineita kuten nikkeliä. Ruostumattomat teräkset voidaan jakaa niiden faasirakenteen mukaan austeniittisiin, ferriittisiin, austeniittis-ferriittisiin (duplex) ja martensiittisiin ruostumattomiin teräksiin.

Austeniittisten ruostumattomien terästen ja duplex-terästen on ehdotettu soveltuvat jännitettävien raudoitteiden materiaaleiksi [32], [33]. Näiden terästen on huomattu kestävän hyvin sekä korroosiota että vetyhaurastumista [34], [35]. Recio et al. [35] vertasivat tutkimuksissaan erilaisten ruostumattomien terästen vetyhaurastumisriskiä FIP-testeillä. He havaitsivat, että kaikki tutkitut ruostumattomat teräkset saivat hyvät tulokset FIP-testissä, mutta vähiten seostettujen näytteiden tulokset olivat muita huonommat.

Matala vetyhaurastumisriski γ- ja duplex-teräksillä on odotettavissa, sillä vety diffuntoituu huonosti γ-faasissa, kuten alaluvussa 2.2 todettiin. Austeniittisten ja duplex-terästen murtolujuutta saadaan nostettua kylmävetämällä samoin kuin eutektoidisten terästen tapauksessa.

Wun ja Nürnbergerin [32] mukaan ruostumaton γ-teräs vaatii voimakasta kylmämuokkausta, jotta sen murtolujuus saadaan yli 1400 MPa:n, mikä jää edelleen eutektoidista terästä matalammalle tasolle. Austeniitti ei ole huoneenlämmössä stabiili faasi, ja voimakas kylmämuokkaaminen voi aiheuttaa siinä faasimuutoksen martensiitiksi [32]. Martensiitin muodostuminen heikentää teräksen korroosionkestoa ja tekee sen alttiimmaksi vetyhaurastumiselle [32], [35]. Wu ja Nürnberger [32] esittivät tälle mahdollisen mekanismin, joka on esitetty kuvassa 3. Heidän mukaansa korrodoiva ympäristö aiheuttaa pistekorroosiota teräksen pinnan martensiittialueilla. Tämä laskee paikallisesti pH:n hyvin matalaksi, jolloin vetyä pääsee absorptoitumaan martensiittiin. Vedyn lisääntynyt absorptoituminen pH:n laskiessa johtuu vedyn liukenemisen tasapainopotentiaalin ja pH:n käänteisestä riippuvuudesta (katso alaluku 4.3). Tämän jälkeen vetyä diffuntoituu syvemmälle muihin martensiittialueisiin, kunnes sitä on kriittinen määrä, ja teräs murtuu ulkoisen jännityksen vaikutuksesta.

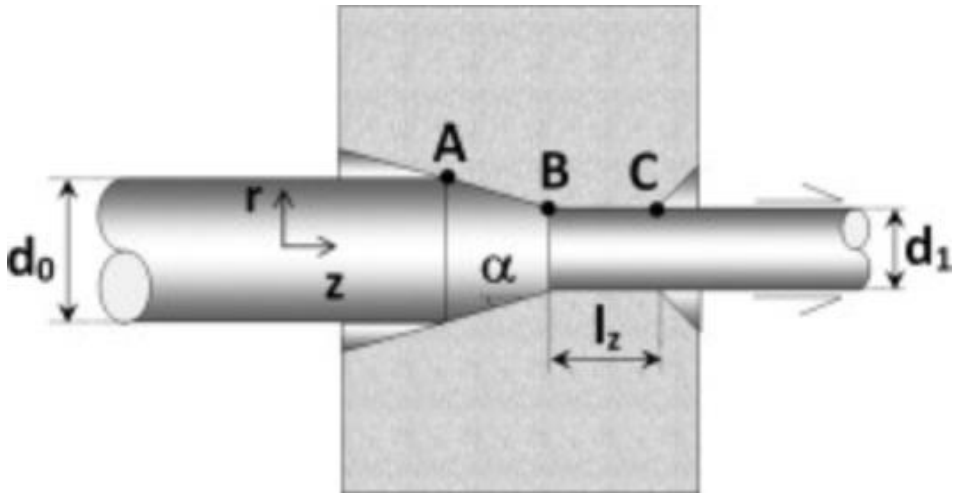


Kuva 3. *Vetymurtuman eteneminen austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä, joka sisältää martensiittialueita [32].*

Seosaineiden, erityisesti nikkelin, mangaanin ja molybdeenin, lisääminen stabiloi austeniittia, jolloin kylmämuokatessa syntyy vähemmän martensiittia [35]. Korrodoivissa ympäristöissä saatetaan täten tulevaisuudessa käyttää runsaasti seostettuja ruostumattomia teräksiä, jotta saavutetaan paitsi hyvä korroosionkesto myös vaadittu vastustuskyky vetyhaurastumiselle. Seosaineiden lisääminen lisää teräksen raaka-ainehintaa, mutta parempi korroosionkesto ja pienentynyt alttius vetyhauraudelle vähentävät sen huollontarvetta ja pidentävät sen käyttöikää.

4.2 Valmistus

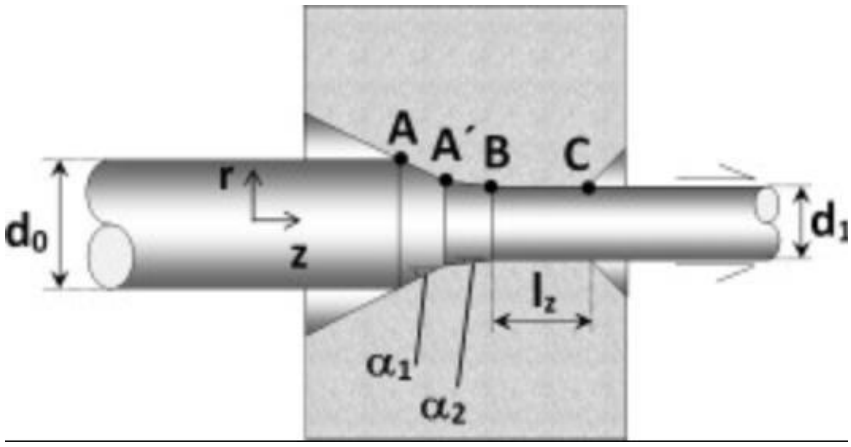
Vetyhaurastumisen kannalta hyvin merkittävä jännitettävän teräksen valmistusvaihe on kylmävetäminen [20], [36], [37]. Toribion et al. [20] mukaan vetävät jäännösjännitykset ja plastiset muodonmuutokset vedetyn teräspalkin pinnalla lisäävät vetyhaurastumisherkkyyttä. Plastinen muokkaantuminen parantaa vedyn liukoisuutta ja heikentää sen diffuusiota, kuten alaluvussa 2.3 todettiin. Toisaalta vetävät jäännösjännitykset helpottavat sekä vedyn liukoisuutta että diffuusiota, jolloin vetyä pääsee helpommin diffuntoitumaan teräksen pinnalta syvemmälle [20]. Eräs tapa vähentää kylmävedettyjen terästankojen vetyhaurastumisherkkyyttä on valita oikeanlaiset kartiokulmat vetomuoteille [36], [37]. Kuvassa 4 on kuvattu skemaattisesti yksivaiheinen kylmävetoprosessi. Kuvassa terästankoa, jonka alkuperäinen halkaisija on d_0, vedetään muotin läpi. Kartiokulma α muokkaa tankoa, jonka lopullinen halkaisija on d_1.



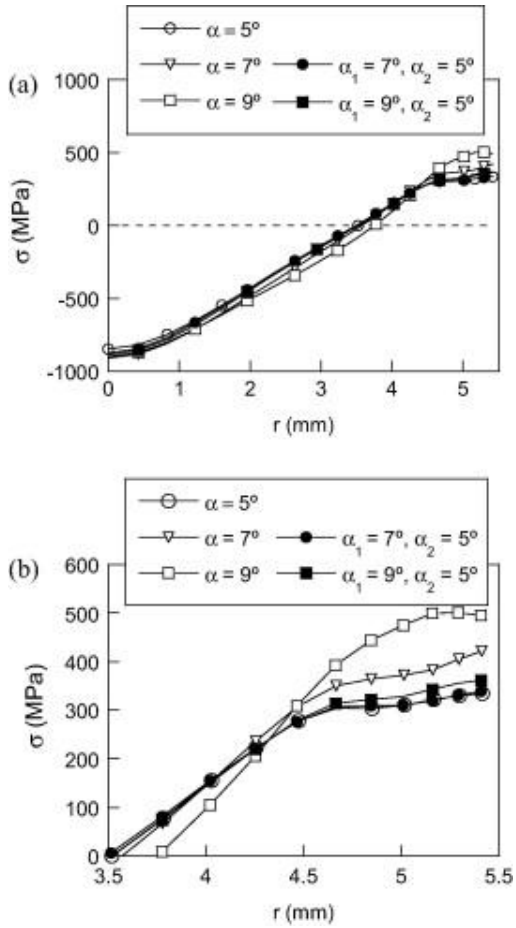
Kuva 4. *Yksivaiheinen kylmävetoprosessi [37]. Kuvassa α on kartiokulma, d_0 on alkuperäinen halkaisija ja d_1 on lopullinen halkaisija.*

Toribio et al. [36] tutkivat eri kartiokulmien α (5°, 7° ja 9°) vaikutusta jäännösjännitystiloihin yksivaiheisen kylmävedon jälkeen. He totesivat, että jäännösjännitykset olivat pienempiä, kun käytettiin pienempiä kartiokulmia. Kulman vaikutus oli erityisen suuri aivan tangon pinnan läheisyydessä, missä jäännösjännitykset ovat pääosin vetäviä. [36] Tämän perusteella pienempien kulmien käyttö valmistusvaiheessa on hyvä keino vähentää herkkyyttä vetyhaurastumiselle.

Pienen kartiokulman käyttö ei aina ole mahdollista. Toribion et al. [37] mukaan tällöin voidaan käyttää modifioituja vetomuotteja (kuva 5), joissa tangon halkaisijaa pienennetään kaksivaiheisesti. He käyttivät tutkimuksessaan muotteja, joissa oli suurempi kartiokulma α_1 ja toinen pienempi kulma α_2, ja vertasivat jäännösjännityksiä yksivaiheisten muottien tuloksiin. Kun toinen kulma oli pieni, jäännösjännitykset pinnan läheisyydessä olivat yhtä pieniä kuin silloin, kun käytettiin yhtä pientä kartiokulmaa (kuva 6). [37] Näiden tutkimustulosten perusteella oikealla vetomuotin valinnalla voidaan parantaa betoniteräksen vastustuskykyä vetyhaurastumiselle. Mitä pienempi viimeinen muokkaava kulma on, sitä suotusampi jäännösjännitysjakauma valmiissa tangoissa on vetyhaurastumisherkkyyden kannalta. Esimerkiksi kaksivaiheinen muotti, jonka ensimmäinen muokkaava kulma on 9° ja toinen 5°, tuottaa lähes yhtä pienen vetävän jännityksen jänteen pinnalle kuin yksivaiheinen muotti, jonka kartiokulma on 5°.



Kuva 5. *Modifioitu vetomuotti, jossa toinen muokkaava kulma α_2 on ensimmäistä kulmaa α_1 pienempi [37].*



Kuva 6. *a) Jäännösjännitykset kylmävedetyn jänteen säteen funktiona. b) Jäännösjännitykset aivan jänteen pinnan läheisyydessä (yksityiskohta a) kuvasta). α on yksivaiheisen muotin kartiokulma, α_1 on kaksivaiheisen muotin ensimmäinen kulma ja α_2 toinen kulma ja r on etäisyys jänteen akselista. [37]*

Kylmävetämisen jälkeen jänteet lämpökäsitellään. Lämpökäsittelyn tarkoitus on vähentää teräksen jäännösjännityksiä ja parantaa sen sitkeyttä. Lämpökäsittelyllä on vaikutusta myös vetyhaurastumisherkkyyteen [38]. Caballero et al. [38] tutkivat erilaisten lämpökäsittelyjen vaikutusta kylmävedettyjen eutektoidisten terästen vetyhaurastumisherkkyyteen. Vetyhaurastumisriskiä arvioitiin kokeellisesti FIP-testillä, jota kuvailtiin alaluvussa 3.5. Näytteet lämmitettiin induktiolla 330, 400 tai 460 °C:ssa 0,5–2 sekunnin ajan. Tutkimuksessa todettiin, että korkeimmissa lämpötiloissa käsitellyt näytteet kestivät FIP-testissä pidemmän aikaa murtumatta kuin matalammissa lämpötiloissa käsitellyt. Toisaalta 460 °C:ssa käsiteltyjen näytteiden myötölujuus laski alle hyväksytyn tason.

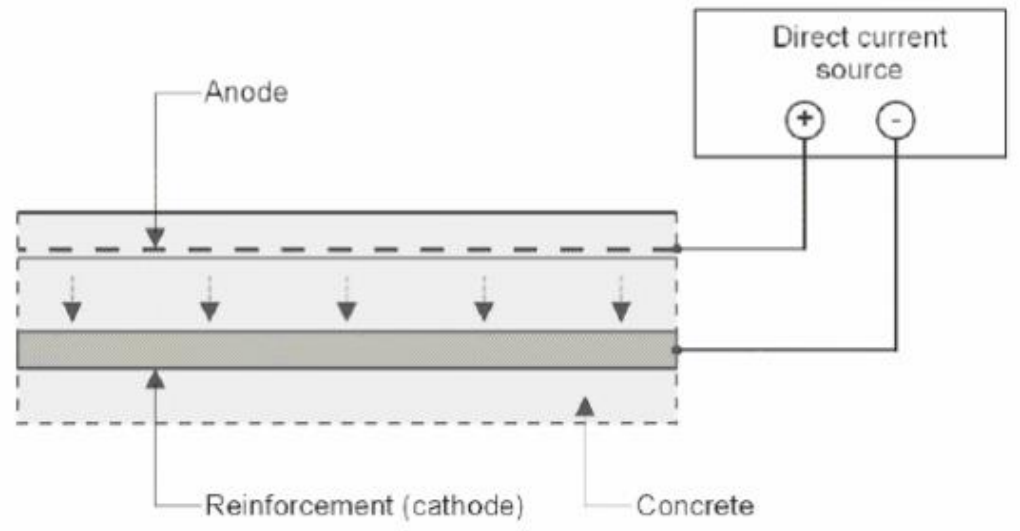
Käsittelylämpötiloja nostamalla voidaan siis parantaa kylmävedetyn teräksen vetyhaurastumisen vastustuskykyä. Tämä kuitenkin samalla laskee teräksen myötö- ja murtolujuuksia [38]. Murtolujuudet laskivat tutkimuksessa vain 40–80 MPa:n verran

lämpökäsittelyn vaikutuksesta, mutta myötölujuudet laskivat merkittävämmin [37]. Standardin SFS 1265-3:en [39] mukaan punoksissa käytetyn jänneteräksen murto- ja myötölujuuden välisen suhteen tulisi olla enintään 1,18. 460 °C:ssa lämpökäsitellyn teräksen myötölujuus oli 1493 MPa ja murtolujuus 1782 MPa [37]. Näiden välinen suhde on noin 1,19, mikä ylittää standardin [38] rajan. Tutkimuksen tekijät eivät olleet varmoja, johtuiko myötölujuuden lasku yksinomaan jäännösjännitysten purkaantumisesta vai jostakin muusta. Matalammissa lämpötiloissa lämpökäsiteltyjen näytteiden myötölujuudet täyttivät standardin [38] vaatimukset. Käsittelylämpötiloja ei siis voida nostaa kovin korkeiksi, jotta mekaaniset ominaisuudet pysyisivät vaaditulla tasolla.

4.3 Katodinen suojaus

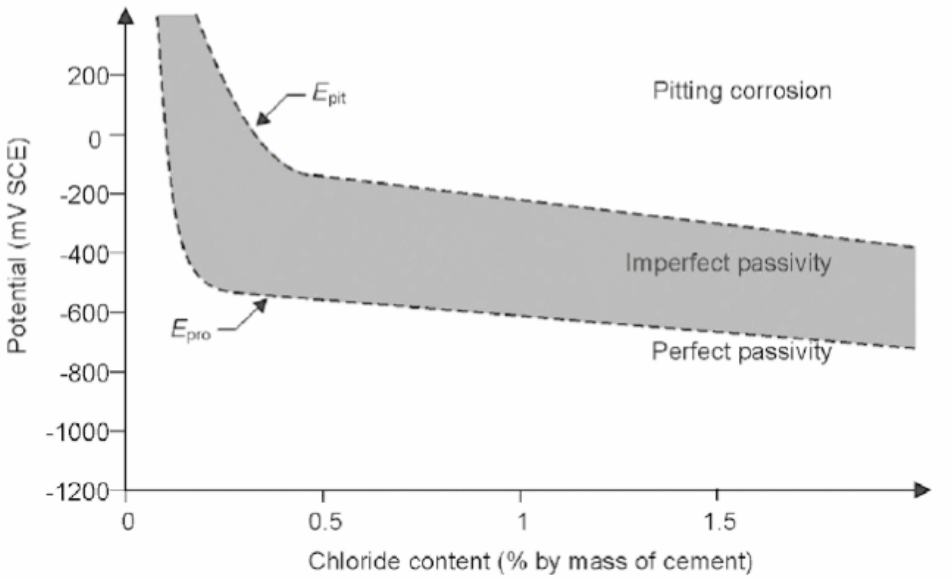
Raudoitusteräkset ovat yleensä hyvin suojassa korrodoivilta aineilta kuten kloori-ioneilta betonikerroksen alla. Sovelluskohteissa, joissa käyttöympäristö sisältää paljon korrodoivia aineita, tarvitaan usein lisäsuojausta. Tällaisia rakennelmia ovat esimerkiksi sillat. Katodinen suojaus on sähkökemiallinen menetelmä, jonka tarkoitus on suojata esimerkiksi raudoitusterästä korroosiolta. Katodinen suojaus voi perustua joko ulkoisen virtalähteen tai uhrautuvan anodin käyttöön, joista ensimmäinen suojaa tehokkaammin korroosiolta. Siinä teräksen sähköistä potentiaalia lasketaan, minkä vaikutuksesta korroosiota voidaan ennaltaehkäistä tai hidastaa. [40, s. 266–268]

Kuvassa 7 on esitetty yksinkertainen periaatekuva katodisesta suojauksesta, jossa käytetään ulkoista virtalähdettä. Kun katodinen suojaus kytketään päälle, anionit kuten Cl^- ja OH^- alkavat siirtyä poispäin katodilta eli teräsraudoitteelta ja kationit kuten Na^+ ja K^+ alkavat kulkea vastakkaiseen suuntaan kohti katodia. [41, s. 370] Kloridi-ionien poistaminen teräksen pinnalta on korroosioneston kannalta tärkeää, sillä kloridien indusoima korroosio on yksi merkittävimmistä korroosiotyypeistä betoniterästen tapauksessa. Pistekorroosio alkaa, kun teräksen pinnalla olevat kloridi-ionit saavuttavat kriittisen konsentraation ja aiheuttavat terästä suojaavan oksidikerroksen paikallisen hajoamisen. Tällöin syntyy pistemäisiä kuoppia, joista korroosio pääsee etenemään nopeasti. [41, s. 93–96]



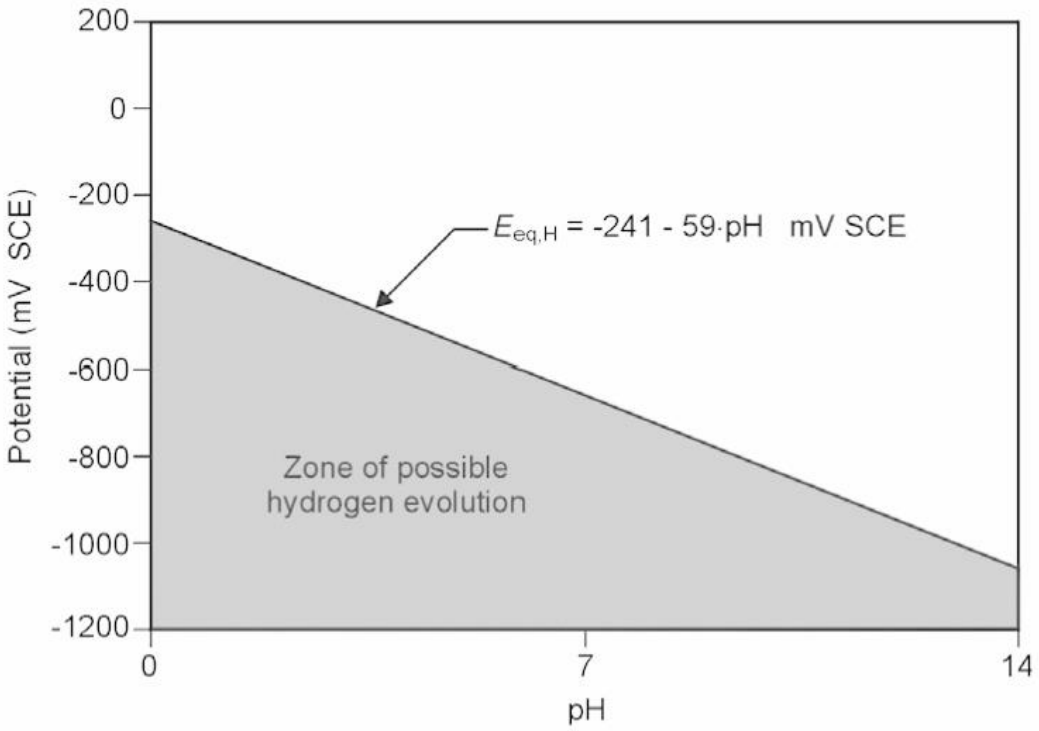
Kuva 7. *Periaatekuva katodisesta suojauksesta [41, s. 366].*

Kuvassa 8 on kuvattu teräksen sähköisen potentiaalin ja betonin klooripitoisuuden välistä yhteyttä korroosiosuojaamisen kannalta. Harmaalla merkityn alueen yläpuolella korroosiota pääsee tapahtumaan, harmaalla alueella korroosio voi käynnistyä mutta ei pääse etenemään ja harmaan alueen alapuolella korroosio ei pääse alkamaan eikä etenemään. [41, s. 373–375] Mitä enemmän klooria betoni sisältää sitä matalampia teräksen sähköisiä potentiaaleja käytetään.



Kuva 8. *Korroosion tapahtumisen riippuvuus teräksen sähköisestä potentiaalista ja betonin klooripitoisuudesta [40, s. 124].*

Vetyhaurastuminen rajoittaa katodisen suojauksen käyttöä erityisesti esijännitetyssä betonissa [42], [43], [44], [45]. Vetyhaurastumista alkaa yleensä tapahtua, kun teräksen sähköinen potentiaali laskee alle -1100 mV:n [41, s. 166], [44], [45]. Teräksen sähköinen potentiaali on tällöin lähellä vedyn liukenemisen tasapainopotentiaalia $E_{eq,H}$. Kuvassa 9 on esitetty $E_{eq,H}$:n riippuvuus pH:sta. Betonin pH on yleensä noin 12, minkä vuoksi vetyä ei ala liueta ennen -1100 mV:a.



Kuva 9. *Vedyn liukenemisen tasapainopotentiaalin riippuvuus pH:sta [41, s. 166].*

Katodisten suojausjärjestelmien suunnittelussa käytetään reiluja turvarajoja vetyhaurastumisen välttämiseksi. Vetyhaurastumisen riski katodisen suojauksen vaikutuksesta on häviävän pieni myös pitkäaikaisessa käytössä, kun teräksen sähköinen potentiaali on positiivisempi kuin -900 mV [42], [43], [44], [45].

5. YHTEENVETO

Raudoitusteräs ei yleensä ole kovin herkkää vetyhaurastumiselle. Esijännitetyn betonin kohdalla vetyhaurastuminen tulee kuitenkin ottaa suunnitteluvaiheessa huomioon, sillä vety sekä altistaa jänteet viivästyneelle murtumalle että nopeuttaa niiden jännityksen menetystä. Tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella jänneteräksen vetyhaurastumisriskiä voidaan pienentää tekemällä oikeita valintoja materiaalivalinnassa, kylmävedossa, lämpökäsittelyssä ja katodisessa suojauksessa.

Jänneterästen materiaaleina käytetään yleensä eutektoidisia teräksiä. Nämä teräkset ovat kylmävedon jälkeen erittäin lujia akselinsa suuntaan, minkä vuoksi ne soveltuvat hyvin jänneteräksiksi. Kaupallisten jänneterästen murtolujuudet vaihtelevat välillä 1570–2160 MPa [23]. Lisäksi eutektoidiset teräkset eivät ole herkkiä vetyhaurastumiselle, sillä vety diffuntoituu niissä huonosti. Sekä suuri dislokaatiotiheys että perliitin sementiittilamellit vaikeuttavat vedyn diffuusiota. Laboratoriokokeissa on huomattu, ettei vetykonsentraatio vaikuta juurikaan eutektoidisten terästen lujuusominaisuuksiin, mutta sen on kuitenkin todettu heikentävän eutektoidisten terästen sitkeyttä merkittävästi [29], [31]. Tämän vuoksi myös eutektoidiset teräkset tulee suojata vedyltä.

Ruostumattomien terästen, erityisesti austeniittisten ja duplex-terästen, käyttöä jänneteräksinä on tutkittu. Nämä teräkset kestävät korroosiota eutektoidisia teräksiä paremmin, mutta niiden alttiutta vetyhaurastumiselle pidetään ongelmana. Austenittisten ja duplex-terästen on havaittu sietävän vetyä eutektoidisia teräksiä paremmin. Ne kuitenkin vaativat voimakasta kylmämuokkausta vaaditun lujuuden saavuttamiseksi. Osa austeniitista voi kylmämuokkauksen vaikutuksesta muuttua martensiitiksi, joka on erityisen herkkää vetyhaurastumiselle. Martensiitin syntymistä voidaan vähentää stabiloimalla austeniittia seosaineita lisäämällä. Seostuksen lisääminen nostaa materiaalikustannuksia. Voimakkaasti seostetut ruostumattomat teräkset ovat siis vaihtoehto eutektoidisille jänneteräksille korrodoivissa olosuhteissa, joissa halvemman eutektoidisen teräksen käyttö ei ole järkevää.

Materiaalivalinnan lisäksi valmistusmenetelmien hallinta on tärkeää vetyhaurastumista ajatellen. Kylmävetämisen aiheuttamat vetävät jäännösjännitykset jänteen pinnalla altistavat jänteen vetyhaurastumiselle, sillä vedossa atomiväleissä on enemmän tilaa välisija-atomeille, mikä nopeuttaa sekä vedyn liukenemista että sen diffuusiota. Vetäviä jäännösjännityksiä voidaan pienentää käyttämällä vetomuoteissa pieniä kartiokulmia.

Tarvittaessa voidaan myös hyödyntää kaksivaiheisesti muokkaavia muotteja, joissa ensimmäinen muokkaava kulma on suurempi ja toinen pienempi, sillä viimeisellä muokkaavalla kulmalla on suurin vaikutus jäännösjännityksiin ensimmäisen kulman suuruudesta riippumatta. Myös lämpökäsittelylämpötilojen nosto vähentää vetyhaurastumisriskiä. Käsittelylämpötiloja ei kuitenkaan ole järkevää nostaa paljoa, sillä teräksen lujuusominaisuudet laskevat samalla nopeasti.

Katodisella suojauksella voidaan parantaa teräksen korroosionkestoa. Teräksen sähköisen potentiaalin laskeminen liian alhaiseksi voi kuitenkin käynnistää vedyn liukenemisen teräksen pinnalta. Sopiva sähköinen potentiaali riippuu pH:sta, joka on betonin sisällä yleensä noin 12. Yleisesti käytetään sähköisiä potentiaaleja, jotka ovat positiivisempia kuin -900 mV:a, vaikka vetyhaurastumisriski alkaa kohota merkittävästi vasta, kun sähköinen potentiaali laskee noin -1 100 mV:iin. Katodisen suojauksen ei näin ollen tulisi aiheuttaa vetyhaurastumista, ellei järjestelmä ala tuottaa haluttua matalampia potentiaaleja, ja ellei ympäristön pH ala laskea.

LÄHTEET

[1] M. Nagumo, Fundamentals of Hydrogen Embrittlement, Springer, 2016.

[2] R. P. Oriani, J. P. Hirth, M. Smialowski, Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys, William Andrew Publishing/Noyes publications, 1985.

[3] T. Lu, Y. P. Xu, X. D. Pan, H. S. Zhou, F. Ding, Z. Yang, G. J. Niu, G. N. Luo, X. C. Li, F. Gao, Atomistic study of hydrogen behavior around dislocations in α iron, Journal of Nuclear Materials, Vol. 510, November 2018, pp. 219–228.

[4] M. Dadfarnia, T. Neeraj, P. Sofronis, Hydrogen interaction with multiple traps: Can it be used to mitigate embrittlement?, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 16, August 2011, pp. 10141–10148.

[5] C. Chen, Y. He, Y. Li, H. Yu, Diffusion coefficient of hydrogen interstitial atom in α-Fe, γ-Fe and ε-Fe crystals by first-principle calculations, International Journal of Hydrogen Energy, November 2017, pp. 27438–27445.

[6] A. H. M. Krom, A. Bakker, Hydrogen Trapping Models in Steel, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 31B, No. 6, December 2000, pp. 1475–1482.

[7] T. Doshida, M. Nakamura, H. Saito, T. Sawada, K. Takai, Hydrogen-enhanced lattice defect formation and hydrogen embrittlement of cyclically prestressed tempered martensitic steel, Acta Materialia, Vol. 61, No. 20, December 2013, pp. 7755–7766.

[8] E. Lunarska, M. Smialowski, A. Zielinski, Effect of hydrogen on shear modulus of polycrystalline α iron, Acta Metallurgica, Vol. 25, No. 3, March 1977, pp. 305–308.

[9] V. Kain, B. S. Kumar, M. Singh, B. Vishwanadh, Influence of hydrogen on mechanical properties and fracture of tempered 13 wt% Cr martensitic stainless steel, Materials Science and Engineering: A, Vol. 700, July 2017, pp. 140–151.

[10] W. L. Costin, R. Ghomashchi, A. Kotousov, O. Lavigne, V. Linton, Investigation of hydrogen assisted cracking in acicular ferrite using site-specific micro-fracture tests, Materials Science and Engineering: A, Vol. 651, January 2016, pp. 859–868.

[11] M. A. Abro, S. H. Bak, D. B. Lee, Effect of Hydrogen and Strain-Induced Martensite on Mechanical Properties of AISI 304 Stainless Steel, Metals, Vol. 6, July 2016.

[12] E. G. Astafurova, S. V. Astafurov, G. G. Maier, H. J. Maier, E. V. Melnikov, V. A. Moskvina, G. N. Zakharov, Hydrogen-enhanced orientation dependence of stress relaxation and strain-aging in Hadfield steel single crystals, Scripta Materialia, Vol. 136, July 2017, pp. 101–105.

[13] N. Hashimoto, S. Ohnuki, S. Wang, Effects of hydrogen on activation volume and density of mobile dislocations in iron-based alloy, Materials Science and Engineering: A, Vol. 562, February 2013, pp. 101–108.

[14] V. S. Raja, T. Shoji, Stress Corrosion Cracking : Theory and Practice, Woodhead Publishing Limited, 2011.

[15] R. A. Oriani, A mechanistic theory of hydrogen embrittlement of steels, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, Vol. 76, No. 8, August 1972, pp. 848–857.

[16] C. D. Beachem, A new model for hydrogen assisted cracking (hydrogen embrittlement), Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 3, February 1972, pp. 441–455.

[17] S. P. Lynch, Mechanisms of hydrogen-assisted cracking, 1979.

[18] W. Krieger, D. Ponge, D. Raabe, M. Rohwerder, B. Sun, Dependence of hydrogen embrittlement mechanisms on microstructure-driven hydrogen distribution in medium Mn steels, Acta Materialia, Vol. 183, January 2020, pp. 313–328.

[19] M. N. Hassoun, A. Al-Manaseer, Structural Concrete : Theory and Design, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015.

[20] J. Toribio, V. Kharin, M. Lorenzo, D. Vergara, Role of drawing-induced residual stresses and strains in the hydrogen embrittlement susceptibility of prestressing steels, Corrosion Science, Vol. 53, No. 10, October 2011, pp. 3346–3355.

[21] P. A. Suriya, Design of Reinforced Concrete, Scientific International, 2017.

[22] P. Bhatt, Prestressed Concrete Design to Eurocodes, CRC Press LLC, 2011.

[23] Jänneteräkset. Osa 1: Yleiset vaatimukset, Suomen standardoimisliitto, SFS 1265-1:en, Helsinki, 2014.

[24] A. Poursaee, Corrosion of Steel in Concrete Structures, Elsevier, 2016.

[25] Stress Corrosion Cracking Test for Prestressing Tendons, International Federation for Prestressing (Fédération Internationale de la Précontrainte), Technical report no. 5, 1978.

[26] M. Elices, L. Caballero, A. Valiente, J. Ruiz, A. Martin, Hydrogen Embrittlement of Steels for Prestressing Concrete: The FIP and DIBt Tests, Corrosion, Vol. 64, No. 2, 2008, pp. 164–174.

[27] D. Grimme, B. Isecke, U. Nürnberger, E. M. Riecke, G. Uhlig, Spannungsrisskorrosion in Spannbetonbauwerken, Verlag Stahleisen mbH, 1983.

[28] J. Mietz, B. Isecke, Assessment of test methods for evaluation stresscorrosion cracking susceptibility of prestressingsteels, Materials and Corrosion, Vol. 53, 2002, pp. 373–384.

[29] D. G. Enos, J. R. Scully, A Critical-Strain Criterion for Hydrogen Embrittlement of Cold-Drawn, Ultrafine Pearlitic Steel, Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 33A, No. 4, April 2002, pp. 1151–1166.

[30] J. Toribio, E. Ovejero, Effect of Cold Drawing on Microstructure and Corrosion Performance of High-Strength Steel, Mechanics of Time-Dependent Materials, Vol. 1, No. 3, 1997, pp. 307–319.

[31] J. Sanchez, L. S. F, M. A. Martin-Rengel, J. Fullea, C. Andrade, J. Ruiz-Hervias, Measurement of hydrogen and embrittlement of high strength steels, Engineering Failure Analysis, Vol. 59, January 2016, pp. 467–477.

[32] Y. Wu, U. Nürnberger, Corrosion-technical properties of high-strength stainless steels for the application in prestressed concrete structures, Materials and Corrosion, Vol. 60, No. 10, October 2009, pp. 771–780.

[33] S. D. Cramer, B. S. Covino, S. J. Bullard, G. R. Holcomb, J. H. Russell, F. J. Nelson, H. M. Laylor, S. M. Soltesz, Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges, Cement and Concrete Compositesm, Vol. 24, No. 1, February 2002, pp. 101–117.

[34] R. D. Moser, P. M. Singh, L. F. Kahn, K. E. Kurtis, Chloride-induced corrosion resistance of high-strength stainless steels in simulated alkaline and carbonated concrete pore solutions, Corrosion Science, Vol. 57, April 2012, pp. 241–253.

[35] F. J. Recio, Y. Wu, M. C. Alonso, U. Nürnberger, Hydrogen embrittlement risk in cold-drawn stainless steels, Materials Science and Engineering: A, Vol. 564, March 2013, pp. 57–64.

[36] J. Toribio, V. Kharin, M. Lorenzo, D. Vergara, Hydrogen Embrittlement of Cold Drawn Prestressing Steels: The Role of the Die Inlet Angle, Materials Science, Vol. 49, No. 2, September 2013, pp. 226–233.

[37] J. Toribio, M. Lorenzo, D. Vergara, On the use of varying die angle for improving the resistance to hydrogen embrittlement of cold drawn prestressing steel wires, Engineering Failure Analysis, January 2015, pp. 273–282.

[38] L. Caballero, M. J. Atienza, M. Elices, Thermo-mechanical treatment effects on stress relaxation and hydrogen embrittlement of cold-drawn eutectoid steels, Metals and Materials International, Vol. 17, No. 6, December 2011, pp. 899–910.

[39] Jänneteräkset. Osa 3: Punos, Suomen standardoimisliitto, SFS 1265-3:en, Helsinki, 2014.

[40] N. Perez, Electrochemistry and Corrosion Science, Springer International Publishing, 2016.

[41] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedeferri, E. Redaelli, R. B. Polder, Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, John Wiley & Sons Inc., 2014.

[42] C. C. Kumria, R. J. Kessler, W. H. Hartt, Influence of Potential, Chlorides, pH, and Precharging Time on Embrittlement of Cathodically Polarized Prestressing Steel, Corrosion Science, Vol. 49, No. 5, February 1992, pp. 377–385.

[43] D. G. Enos, A. J. Williams, J. R. Scully, Long-term effects of cathodic protection on prestressed concrete structures: Hydrogen embrittlement of prestressing steel, Corrosion Science, Vol. 53, No. 11, November 1997, pp. 891–908.

[44] K. Ishii, H. Seki, T. Fukute, K. Ikawa, Cathodic protection for prestressed concrete structures, Construction and Building Materials, Vol. 12, No. 2–3, March 1998, pp. 125–132.

[45] R. Polder, W. Peelen, Cathodic protection of reinforcement in concrete – experience and development over 30 years, MATEC Web of Conferences, Vol. 289, 2019.