
JavaScriptin staattinen tyypittäminen

LuK -tutkielma
Turun yliopisto
Tulevaisuuden teknologioiden laitos
Tietojenkäsittelytiede
2018
Oskari Noppa

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Peruskäsitteitä	3
2.1	Tyyppijärjestelmien luokittelu	3
2.2	ECMA-262, EcmaScript ja JavaScript	4
2.3	TypeScript	5
2.4	Flow	5
2.5	Closure-kääntäjä	5
3	JavaScript-ohjelman muuttaminen staattisesti tyyppitarkastetuksi	7
3.1	Tyoppiannotaatiot	7
3.2	Ohjelman kääntäminen ennen suorittamista	9
3.3	Työkalun vaiheittainen käyttöönotto	10
4	Staattisen tyyppityksen hyödyt	13
4.1	Virheiden havaitseminen	13
4.2	Ohjelman optimointi käännösvaiheessa	15
4.3	Tyypinmäärittelyt dokumentaationa	16
5	Ongelmat JavaScriptin staattisessa tyyppittämisessä	19
5.1	EcmaScript-yhteensopivuus	19
5.2	Automaattinen ja vaiheittainen tyyppittäminen	20

5.3	Luotettavuus, täydellisyys ja käytännöllisyys	21
6	Yhteenveto	24
	Lähdeluettelo	26

Luku 1

Johdanto

Ohjelmointi on pohjimmiltaan tietorakenteiden käsittelyä ja yksi tärkeimmistä tietorakenteen ominaisuuksista on sen tyyppi. Muuttuja "nimi" voi olla datatyyppiltään teksti ja muuttuja "ikä" voi olla numero, eikä näitä kahta voi huolettomasti sekoittaa. Ohjelman tila ei ole järkevä jos se sanoo henkilön iän olevan "Matti". Se miten ohjelmointikielissä käsitellään arvojen tyyppejä vaihtelee kuitenkin suuresti.

Tässä tutkielmassa käsitellään JavaScriptiä, sekä kolmea työkalua jotka rakentavat staattisesti tarkastettavan tyyppijärjestelmän JavaScriptin päälle. JavaScript on *dynaamisesti tyyhitetty* ohjelmointikieli, jonka alkuperäinen käyttötarkoitus oli lisätä verkkosivuille pieniä interaktiivisia ominaisuuksia, kuten lomakkeiden validointia. JavaScriptillä toteutettavien ohjelmien koko, monimutkaisuus ja tärkeys on kuitenkin viime vuosien aikana kasvanut alkuperäistä tarkoituspää suuremmaksi, kun sillä on alettu toteuttaa esimerkiksi kartta-, kirjoitus- ja hallintapalveluita jotka toimivat selaimessa, siten ettei käyttäjän tarvitse asentaa erillistä tietokoneohjelmaa palvelun käyttöön. JavaScriptia on myös alettu käyttää verkkosivujen *front-end* käyttöliittymätoteutuksen lisäksi tietokone- ja kännykkäsovelluksissa, sekä palvelinkielenä *back-endillä*.

Tutkielmassa esitellään TypeScript, Flow ja Closure-kääntäjä, joista jokainen on tarkoitettu työkaluksi sellaisten ohjelmien kehittämiseen, jotka muuten kehitettäisiin JavaScriptilla. Päämääränä on esitellä kuinka dynaamisesti tyyhitetty JavaScript voidaan muuttaa staattisesti tyyppitarkastetuksi TypeScriptin, Flown, tai Closure-kääntäjän avulla, sekä mitä hyötyä siitä voi olla. Työkalujen hyötyjä ja haittoja vertaillaan sekä toisiinsa

että tavalliseen JavaScript-koodiin.

Luku 2

Peruskäsitteitä

2.1 Tyyppijärjestelmien luokitteleminen

Ohjelmointikielten tyyppijärjestelmien jakaminen staattisesti ja dynaamisesti tyypitarkastettuihin perustuu ohjelman kehitysvaiheeseen, jossa tarkastaminen tapahtuu. Staattisella tyypitarkastamisella viitataan ohjelman tyyppien analyysiin ennen ohjelman suorittamista, esimerkiksi käännösaikana, kun taas dynaaminen tyypitarkastus varmistaa arvojen tyyppien oikeellisuuden ohjelmaa suoritettaessa. Tyyppijärjestelmät voidaan jao- tella myös muiden ominaisuuksien perusteella esimerkiksi vahvoihin ja heikkoihin tyyp- pijärjestelmiin. Näiden termien merkitys ei ole tarkasti määritelty, mutta yleisesti niillä viitataan tapaan, jolla kieli käsittelee tarkoitettua poikkeavat, virheelliset tyypit [1]. Vah- vasti tyypitetystä kielessä tietyn tyyppisen muuttujan vääränlainen käsittely aiheuttaisi käännös- tai ajonaikaisen virheen, kun taas heikosti tyypitetystä kielessä arvolle voitai- siin tehdä implisiittisiä tyypimuunnoksia niiden yhteensopivuuden saavuttamiseksi.

JavaScript on dynaamisesti tarkastettu, heikosti tyypitetty kieli. Esimerkiksi ohjelma `"teksti".potenssiin(3)` antaa staattisesti tyypitarkastetussa kielessä virheen jo käännösaikana, mikäli metodia `potenssiin` ei ole tekstityypisille arvoille määri- tetty. JavaScriptiä suorittava ympäristö sen sijaan hyväksyisi ohjelman ja sallisi sen suo- rittamisen. Virhe olemattoman metodin kutsumisesta ilmenisi vasta, jos kyseinen virheen sisältävä koodi suoritetaan.

Lisäksi esimerkiksi ilmaisu `"teksti" + 2` ei aiheuttaisi virhettä edes suoritusai- ka-



Kuva 2.1: Tyypijärjestelmät eri ohjelmointikielissä

na, sillä heikoille tyypijärjestelmille ominaisesti JavaScript muuttaisi numeron 2 tekstimuotoon ennen summausoperaation arviointia. Tässä tutkielmassa keskitytään lähinnä JavaScriptin tyyppien staattiseen ja dynaamiseen, eli käytännössä käänös- ja ajonaikaiseen tarkastamiseen. Eräät esitellyistä työkaluista myös tiukentavat kielen sallimia operaatioita siten, että esimerkiksi yllä esitettyä `"teksti" + 2` ohjelmaa ei enää sallittaisi. Monia muita heikoille tyypijärjestelmille tavallisia ominaisuuksia jää kuitenkin tarkistamatta.

2.2 ECMA-262, EcmaScript ja JavaScript

EcmaScript on ECMA-262 standardin määrittelemä ohjelmointikieli [2, 3], jonka kehityksestä vastaa organisaatio Ecma International. *JavaScript* puolestaan on Oraclen omistama tavaramerkki jolla viitataan EcmaScript-kielen osittaisiin tai täydellisiin toteutuksiin [2]. Historiallisista syistä termejä “JavaScript” ja “EcmaScript” käytetään usein keskenään vaihtokelpoisesti. Tässä tutkielmassa termillä “JavaScript” viitataan ECMA-262:n kahdeksannen version mukaiseen EcmaScriptiin, jota kutsutaan myös nimellä EcmaScript 2017.

2.3 TypeScript

TypeScript on Microsoftin luoma ohjelmointikieli, jonka tarkoitus on auttaa JavaScript-ohjelmien kehitystä staattisen tyyppijärjestelmän avulla. Se on EcmaScriptin ylijoukko (engl. superset) [4] ja jatkaa JavaScriptin syntaksia tyyppimäärittelyihin käytettävällä annotaationsyntaksilla. Jokainen validi JavaScript-ohjelma on syntaksiltaan ja ajon aikaiselta käyttäytymiseltään validi TypeScript-ohjelma. TypeScript kuitenkin lisää kehitykseen käännösvaiheen, jossa ohjelman tyyppien oikeellisuus tarkastetaan staattisesti. TypeScript-koodi käännetään JavaScriptiksi, joka puolestaan voidaan suorittaa selaimissa tai muissa JavaScriptin suoritussympäristöissä. TypeScript-kääntäjän voi myös määrittää muokkaamaan tulostettava koodi yhteensopivaksi vanhojen EcmaScript-standardien kanssa, mikä on hyödyllistä, jos ohjelman on tarkoitus tukea sellaisia suoritussympäristöjä, jotka eivät tue uusinta EcmaScriptin versiota.

2.4 Flow

Flow on Facebookin kehittämä työkalu, joka TypeScriptin tavoin jatkaa JavaScriptin syntaksia staattisesti tarkastettavilla tyyppimäärittelyillä. Flow itsessään ei sisällä kääntäjää, vaan keskittyy yksinomaan ohjelman tyyppiturvallisuuden tarkastamiseen. Koodiin lisätyt tyyppimäärittelyt on kuitenkin poistettava ennen kuin JavaScript-ohjelma voidaan suorittaa. Tähän tarkoitukseen voidaan käyttää esimerkiksi Babel-kääntäjää, joka poistaa Flow-tyyppimäärittelyt ja muokkaa JavaScript-koodin yhteensopivaksi toivotun EcmaScript-version kanssa [5].

2.5 Closure-kääntäjä

Googlen Closure-kääntäjä on käännöstyökalu, jonka pääasiallinen tarkoitus on minimoida ja optimoida JavaScript-koodia käännösvaiheessa ennen tuotantoon siirtämistä. Closure sisältää kuitenkin myös tuen tyyppivirheiden tarkastamiselle käännösvaiheessa [6]. Tyyppit annotoidaan erityisellä JSDoc-pohjaisilla dokumentaatiokommenteilla. Koska anno-

taatiot ovat kommenteissa eivätkä erityisenä syntaksina muun suoritettavan koodin joukossa, Closure-annotoitua JavaScriptiä ei tarvitse kääntää ennen sen suorittamista [7]. Kehittäjä voi suorittaa koodin sellaisenaan ilman aikaavievää käännösprosessia. Kun ohjelma on valmis, se voidaan haluttaessa ajaa Closure-kääntäjän läpi tiedostokoon ja suoritussopeuden optimoinniksi.

Luku 3

JavaScript-ohjelman muuttaminen staattisesti tyyppitarkastetuksi

3.1 Tyyppiannotaatiot

Tyyppijärjestelmä voi päätellä muuttujan sallitun tyypin automaattisesti päättelemällä tai kieleen sisältyvien eksplisiittisten tyyppimäärittelyjen perusteella. Kaikki kolme tässä tutkielmassa esiteltyä JavaScriptin staattiseen tyyppitarkastukseen tarkoitettua työkalua päättelevät muuttujien tyyppiä automaattisesti, mutta vaativat paikoitellen myös eksplisiittisiä määrittämiä. Closure-kääntäjä lukee tyyppimäärittelyt JSDoc-tyylisistä dokumentaatiokommenteista [7].

```
1  /**
2   * @param {!Array<Ostos>} ostokset
3   * @return {number} Ostosten yhteenlaskettu hinta
4   */
5  function ostoskorinHinta(ostokset) {
6      let summa = 0;
7      for (const ostos of ostokset) summa += ostos.hinta;
8      return summa;
9  }
```

Listaus 3.1: Esimerkki Closure-annotaatiosta funktiolle

Listauksessa 3.1 `ostoskorinHinta` -funktion tyyppimäärittely on toteutettu sen yläpuolella olevilla kommentteilla, jotka määrittävät tyypin `ostokset` parametrille sekä funktion palautusarvolle. TypeScript ja Flow puolestaan jatkavat ECMA-262-spesifikaatiota erityisellä syntaksilla tyyppien eksplisiittistä määrittämistä varten. Flow ja TypeScript -esimerkissä 3.2 tyyppiannotaatiot ovat osana koodia, mikä tekee ohjelmasta yhteenso-

```
1 function ostoskorinHinta(ostokset: Ostos[]): number {
```

Lista 3.2: Esimerkki Flow tai TypeScript annotaatiosta funktiolle

pimattoman tavallisen JavaScriptin kanssa. Ohjelma on käännettävä JavaScriptiksi ennen suorittamista. Annotaatioiden syntaksi ja merkitys eivät myöskään ole välttämättä suoraan selviä JavaScript-ohjelmoijalle, joka pahimmassa tapauksessa voi kokea lisätyt tyyppimäärittelyt vaikeasti luettavina.

Closuren annotaatiot on sijoitettu kommentteihin, joten niillä ei ole ajonaikaista vaikutusta ja ohjelma on täten sellaisenaan hyväksyttävää JavaScriptiä. Toisaalta tyyppiannotaatioiden määrittely kommentteissa voi olla runsassanaista ja hankalaa, mikä kasvattaa niiden kirjoittamiseen vaadittua työmäärää [4, 8].

Aiemmassa esimerkissä esitelty tyyppi `Ostos` pitäisi määritellä Closurea varten muiden annotaatioiden tapaan dokumentaatiokommentteja käyttäen:

```
1 /**
2  * @typedef {{
3  *   nimi: string,
4  *   hinta: number
5  * }}
6  */
7 let Ostos;
```

TypeScript ja Flow tarjoavat käännösaikaisen tyyppin (type alias) määrittelyyn tiiviimmän ja helppolukuisemman syntaksin [4]:

```
1 type Ostos = {
2   nimi: string;
3   hinta: number;
4 };
```

Tällainen tyyppin määrittelyminen vaikuttaa ainoastaan käännosvaiheen tyyppitarkastukseen, eikä määrittely tuota tietorakenteita tai muuta sisältöä suoritettavaan JavaScript-ohjelmaan.

3.2 Ohjelman kääntäminen ennen suorittamista



Kuva 3.1: Vaihtoehtoisia käännösprosesseja

JavaScript-koodi tulkataan tai käännetään tyypillisesti suorittamisen yhteydessä, selaimesta tai muusta suoritussympäristöstä löytyvän "moottorin" toimesta. EcmaScript-standardin mukaista koodia suorittamaan suunnitellut moottorit, kuten V8 tai SpiderMonkey, eivät kuitenkaan osaa käsitellä TypeScript- tai Flow-annotaatioilla merkattua koodia. Näinollen TypeScript- tai Flow-annotoitu koodi on välttämätöntä kääntää muotoon jossa annotaatiot on poistettu ja jäljellä on enää standardinmukainen JavaScript. Koska JavaScriptin käyttäminen ei normaalisti vaadi erillistä käännösvaihetta, useissa projekteissa ei ole sellaista käytetty. Koodin minimointi ja muu optimointi on ollut parhaiden käytäntöjen mukaista jo tovin, mutta tällaiset koodinkäsittelyt tehdään yleensä vasta ennen ohjelman

julkaisua. Kehittäjät ovat tavanomaisesti voineet suorittaa kirjoittamansa JavaScriptin selaisenaan kehitysympäristössä. Käännösvaiheen aikavaatimus pyritään luonnollisesti pitämään mahdollisimman pienenä, mutta se on silti projektin monimutkaisuuteen ja kehitysnopeuteen vaikuttava tekijä, joka tulee huomioida työkalun käyttöönotossa.

Kuva 3.1 esittää erilaisia käännösprosesseja eri JavaScript-ohjelman kehityskielille. Jos koodi kirjoitetaan kaikkiin suoritussympäristöihin soveltuvalla kielen versiolla, kuten EcmaScriptin versiolla 5 (2011), käännösvaihe voidaan jättää kokonaan väliin. Kielen uudemmat versiot ovat kuitenkin tuoneet monia lisäominaisuuksia, joiden käyttäminen vanhempia selaimia tukevissa ohjelmissa vaatii joka tapauksessa käännösvaiheen staattisesta tyypittämisestä riippumatta. Uusia JavaScript-ominaisuuksia hyödyntäville projekteille koodin kääntäminen ei siis tule täysin uutena vaiheena.

3.3 Työkalun vaiheittainen käyttöönotto

JavaScript-kirjastojen hallintaan tarkoitettu rekisteri *npm* on yksi suurimmista ohjelmistokekosysteemeistä [9]. Tämän tutkielman kirjoittamisen hetkellä rekisterin kotisivu, *npmjs.com*, ilmoitti julkisesti saatavilla olevien pakettien määräksi yli 800 000. Avoimessa jakelussa olevien kirjastojen lisäksi JavaScriptiä käytävillä kehittäjillä voi olla suuri määrä valmista JavaScript-koodia, jota voi hyödyntää uusissa projekteissa. Jotta TypeScript, Flow ja Closure olisivat hyödyllisiä työkaluja JavaScript-ohjelmien kehitykseen, on niiden oltava yhteensopivia sellaisen JavaScript-koodin kanssa jonka kehitykseen ei kyseistä työkalua ole käytetty.

TypeScript ja Flow tukevat erityisiä määrittelytiedostoja, joiden sisältämällä tyyppianotoidulla koodilla määritetään kirjaston tai muun JavaScript-koodin ulkoisen rajapinnan tyyppimäärittelyt. Näiden tiedostojen kirjoittamiseen käytetty syntaksi on muuten sama kuin muissakin tiedostoissa, muuta niiden funktio- ja metodimäärittelyistä on jätetty implementaatiot kokonaan pois. Tiedoston ei ole tarkoitus olla osana varsinaista suoritettavaa koodia, vaan se palvelee ainoastaan kuvauksena sellaisen koodin tyyppimäärittelys-

tä, jonka käsittelyä TypeScript ja Flow eivät muuten voisi valvoa. TypeScriptillä voitaisiin esimerkiksi kirjoittaa seuraava tiedosto `ostoskori.d.ts`, jonka tehtävä on annotoida toista tiedostoa `ostoskori.js`.

```
1 export const tuotteet: ReadonlyArray<Ostos>;
2
3 /** Lisää tuotteen ostoskoriin. */
4 export function lisääTuote(ostos: Ostos): void;
```

Listaus 3.3: Esimerkki TypeScript määrittelytiedostosta `ostoskori.d.ts`

Tämän jälkeen TypeScript tiedostosta käsin voidaan kutsua tätä JavaScript-funktiota siten, että TypeScript valvoo tyyppien oikeellisuutta.

```
1 import * as ostoskori from "./ostoskori";
2
3 ostoskori.lisääTuote({ nimi: "juusto", hinta: 5 });
4 // Vääränlainen kutsumistapa aiheuttaisi käännösaikaisen virheen:
5 // ostoskori.lisääTuote('juusto', 5);
```

Listaus 3.4: JavaScript-koodin kutsuminen TypeScript tiedostosta `tuotesivu.ts`

JavaScript-kirjaston kehittäjä voi tarjota erillisen tyyppitystiedoston kirjastonsa lähdekoodin mukana, tai muut kirjastoa käyttävät kehittäjät voivat oma-aloitteisesti luoda sellaisen tyyppitystiedostoja keräävään julkaisuarkistoon (engl. repository). TypeScriptin tyyppitystiedostoille on *DefinitelyTyped* [10] ja Flowlle vastaavasti *flow-typed* [11]. Vaikka Flow ja TypeScript ovatkin monin tavoin hyvin samankaltaisia, eivät ne kuitenkaan ole täysin yhteensopivia. Yhdelle tyyppijärjestelmälle luotuja annotaatiotiedostoja ei siis yleensä voi suoraan käyttää toisella järjestelmällä, joskin niiden muuntaminen toisen tyyppijärjestelmän käytettäväksi on useimmiten melko suoraviivaista ja ainakin osin automatisoitavissa työkaluilla kuten *flowgen* (TypeScript-tyypitykset Flow-tyypityksiksi) [12], *clutz* (Closure-tyypitykset TypeScript-tyypityksiksi) [13] ja *tsickle* (TypeScript-annotoitu koodi Closure-annotoiduksi) [14]. Joitain perustavanlaatuisia eroja työkalujen välillä voi silti olla vaikea tai mahdotonta siirtää tyyppijärjestelmästä toiseen tekemättä kompromisseja. TypeScriptissä esimerkiksi kaikki *enum*ejä lukuunottamatta on *rakenteellisesti* (engl. structural) tyyppitetty, kun taas Flowssa esimerkiksi luokkien instanssien tyyppiä

vertaillaan *nimellisesti* (engl. nominal), mikä aiheuttaa tyyppijärjestelmien käyttäytymisessä eroja jos jotkin kaksi luokkaa ovat rakenteeltaan täysin samat. Tämän tutkielman viimeisestä luvusta löytyy esimerkki 5.4 juuri tällaisesta tilanteesta; siinä luokat "Ihminen" ja "Eläin" ovat rakenteeltaan samanlaisia ja käsitellään siksi TypeScriptissä kuin ne olisivat sama luokka, mutta Flowssa kahtena erillisenä luokkana jotka eivät ole keskenään vaihtokelpoisia.

Joissain tapauksissa kirjastoille tai kehittäjän omalle aiemmin kirjoitetulle JavaScript-koodille ei kuitenkaan ole valmiita TypeScript-tyyppimäärittelyjä eikä niitä syystä tai toisesta voida luoda ennen muun kehityksen jatkamista. JavaScript-kirjaston rajapinta voi olla liian iso tyypitettäväksi projektin aikatauluun sopivalla tahdilla, tai se saattaa olla suunniteltu käyttämään sellaisia dynaamisia JavaScriptin ominaisuuksia joita ei helposti voida tyypittää TypeScriptin, Flown tai Closures tarjoamalla tyyppijärjestelmällä. Kaikkien kolmen työkalun tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluu tuki vaihteittaiselle käyttöönotolle, eli käytännössä yhteenspivuus täysin tyyppitarkastamattoman koodin kanssa. Sekä Flow että TypeScript tarjoavat erityisen yleisviittaustyyppin Any, jota voi käyttää kuvaamaan mitä tahansa JavaScript arvoa [4]. Any-tyyppiseen muuttujaan voidaan asettaa mikä tahansa arvo ja Any tyyppinen arvo voidaan asettaa mihin tahansa muuttujaan tai funktioparametriin. Any tyyppin avulla muuten staattisesti tyypitetyssä ohjelmassa voidaan ohittaa käännösaikainen tyyppien tarkistaminen sellaisten koodin osien kohdalla joiden ajonaikaista arvoa olisi muuten vaikea tai mahdotonta määritellä käännösaikana. Näin ollen, mikäli tarve vaatii täysin annotoimattoman JavaScript moduulin käyttämistä, kaikkien kyseisestä moduulista tuotujen arvojen voidaan määrittää olevan tyyppiä Any, jolloin tarkastaja ei kiinnitä huomiota siihen miten JavaScriptillä määritettyjä funktioita tai muita arvoja käsitellään.

Luku 4

Staattisen tyyppityksen hyödyt

4.1 Virheiden havaitseminen

Kenties tärkein staattisen tyyppijärjestelmän tehtävä on havaita ja estää ohjelmoijan virheitä. Tyypisäännöt eivät kykene tunnistamaan yleisesti kaikenlaisia ongelmia koodissa — bugin lähteenä voi esimerkiksi olla väärinymmärrys, jossa ohjelman vaatimukset on tulkittu ja toteutettu väärin. Vaikka staattiset tyyppijärjestelmät eivät kykenisikään ehkäisemään kaikkia virheitä, niillä voidaan kuitenkin havaita tietyn luokan virheet systemaattisesti. Johdannossa annettiin esimerkki ohjelman virheellisestä tilasta, jossa henkilön ikää kuvaavaan muuttujaan oli päätynyt tekstimuotoinen arvo, "Matti". Tämä on yksinkertainen esimerkki virheestä joka olisi luultavasti helposti havaittavissa staattisen tyyppijärjestelmän avulla. Tässä tutkielmassa esitellyt työkalut, mahdollisesti Closure-kääntäjää lukuunottamatta, onkin kehitetty erityisesti tätä tarkoitusta varten.

Kaikki kolme työkalua antaisivat käännösvirheen jos esimerkeissä 3.1 ja 3.2 esitellyä ostoskorifunktiota kutsuttaisiin virheellisesti esimerkiksi listalla hintaa kuvaavia numeroita, sillä funktion parametrin on annotoitu olevan lista “Ostos”-tyyppimääritelmän mukaisia objekteja. Esimerkiksi virheellinen kutsu `ostoskorinHinta([5, 10, 15])` ei itse asiassa aiheuttaisi suoritettaessa ohjelman keskeyttävää virhettä. `ostos.hinta` ilmaisu on sallittu vaikka muuttuja `ostos` olisikin arvoltaan numero eikä objekti. Tällöin ilmaisun arvo on `undefined` ja lausekkeen `summa += ostos.hinta` jälkeen `summa` muuttujan arvo on erityinen ei-numeroa kuvaava `NaN` [15]. Käännösaikaisen tarkistami-



Kuva 4.1: To Type or Not to Type: Quantifying Detectable Bugs in JavaScript -tutkimuksen käsittelemät bugit [16].

sen merkitys korostuu erityisen hyödylliseksi tämänkaltaisen ohjelmointivirheen kohdalla, sillä virhe ei välttämättä ole muutoin helposti havaittavissa. Funktiokutsu ei aiheuttaisi helposti todennettavaa suoritusajasta virhettä, joten ei-toivottu palautusarvo `NaN` saattaisi kiertää ohjelman operaatioiden välillä pitkällekin aiheuttaen muita loogisia virheitä.

Vuonna 2017 tehdyssä tutkimuksessa TypeScriptin ja Flow'n vaikutuksesta avoimen lähdekoodin JavaScript-projekteihin havaittiin, että vähintään 15% ilmoitetuista ja korjatuista bugeista olisi voitu havaita ja välttää jos projektin kehitykseen oltaisiin käytetty jompaakumpaa näistä työkaluista [16]. To Type or Not to Type: Quantifying Detectable Bugs in JavaScript -tutkimuksen arvioinnissa huomioitiin lisäksi, että tulos on tutkimusmenetelmästä johtuen mitä luultavimmin alempi kuin tällaisen muutoksen tuoma todellinen vaikutus. Tutkimus toteutettiin muuntamalla avoimen lähdekoodin JavaScript-kirjastoja ensin staattisesti tyyppitettyyn muotoon ja sitten testaamalla kuinka hyvin tyyppitarkastus havaitsi ennalta tunnettuja bugeja aiheuttavan koodin. Sen ulkopuolelle jäivät bugit joita ei oltu vielä korjattu tai havaittu, sekä bugit jotka kehittäjä oli havainnut jossain kehitysvaiheessa ennen virheellisen ohjelman julkaisua. Staattisen tyyppitarkastus luultavasti auttaisi vähentämään myös näitä bugeja.

Kuvaajan 4.1 esittämässä tilanteessa suuri osa bugeista ei ole julkisia, eli kehittäjät eivät ole havainneet bugia eivätkä käyttäjät ole ilmoittaneet sellaisesta. Esimerkiksi seuraavanlainen koodi saattaisi aiheuttaa vaikeasti havaittavan virheen joka jäisi helposti dy-

naamisessa testaamisessa huomaamatta:

```
1 if (viikonpaiva === "perjantai") {  
2   // Alennus perjantaisin 5 euroa  
3   ostoskori.lisääTuote({ nimi: "astiasto", Hinta: 10 });  
4 } else {  
5   ostoskori.lisääTuote({ nimi: "astiasto", hinta: 15 });  
6 }
```

Listaus 4.1: Vaikeasti havaittavan virheen aiheuttava koodiesimerkki

Esimerkin koodi ei toimi oikein perjantaisin, sillä `Ostos`-tyyppisen objektin ominaisuus `hinta` on virheellisesti kirjoitettu isolla alkukirjaimella. Koska bugi toistuu vain tietyissä olosuhteissa, se voi pysyä havaitsemattomana pitkään. Staattinen analyysi etsii tyyppivirheitä kaikista koodin haaroista ja tyyppiannotoituina kaikki kolme työkalua pystyvätkin osoittamaan esimerkissä olevan virheen.

4.2 Ohjelman optimointi käännösvaiheessa

Aivan ensimmäiset tyyppijärjestelmät, kuten Fortranin (1957) staattinen tyyppitys, kehitettiin laskutoimitusten suoritusajan optimointia varten [17]. Myös uudemmissa kielissä muuttujien tyypeistä saatavilla olevaa tietoa voidaan käyttää ajonaikaisen turvallisuuden varmistavien tarkistusten optimointiin.

Kun JavaScriptia optimoidaan käännösvaiheessa, on kuitenkin usein hyödyllistä kiinnittää enemmän huomiota tuotetun koodin kokoon kuin suoritusajaiseen tehokkuuteen. Tyypillinen JavaScript-ohjelma ladataan sivulle saapuessa internet-yhteyden yli juuri ennen suorittamista, minkä vuoksi ladattavan koodin koon kasvattaminen minimaalisen suoritusajan edun vuoksi ei usein ole kokonaisuudessaan hyödyllistä. Closure-kääntäjä on kehitetty erityisesti JavaScript-koodin koon optimointia ajatellen. Muuttujanimet voidaan helposti uudelleennimetä ilmankin staattisen tyyppityksen apua, mutta sen lisäksi myös joukko muita koodia keventäviä optimointeja on käytettävissä kun kääntäjällä on muuttujien tyypeistä saatava tieto käytettävissä. Closure-kääntäjä osaa uudelleennimetä myös luokkamuuttujien nimiä lyhyemmiksi, poistaa käyttämätöntä koodia, sekä korvata yk-

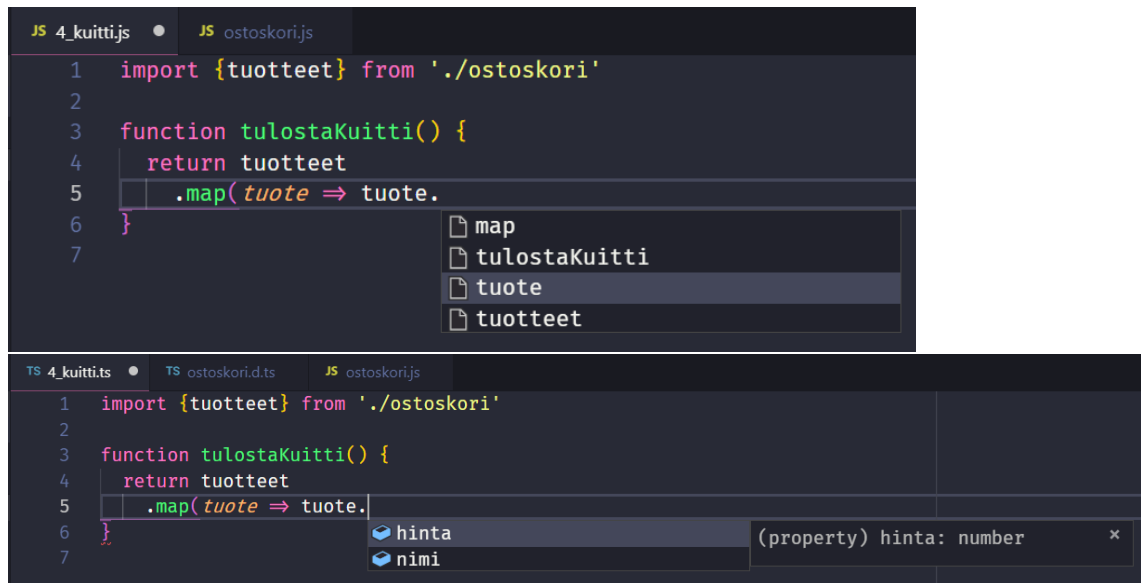
sinkertaisia funktiokutsuja siirtämällä funktion sisältämät ohjeet kutsuntapaikalle (engl. function inlining).

4.3 Tyypinmäärittelyt dokumentaationa

Nykyaikasten editorien vakio-ominaisuuksiin kuuluu kirjoittamisen tukeminen automaattisilla ehdotuksilla. Yksinkertaisimmillaan ehdotukset voivat perustua avatuissa tiedostoissa käytettyihin sanoihin, joita editori ehdottaa käytettäväksi uudelleen koodia kirjoitettaessa. Alkeellisetkin ehdotukset voivat nopeuttaa kirjoittamista silloin kun ne sattuvat osumaan oikeaan, mutta suurempi hyöty saadaan kun ehdotusten taustalla on syvempää koodin analyysia. Kun editori tai ehdotukset tarjoava editorin lisätyökalu ymmärtää koodissa olevia rakenteita ja niiden tyyppejä, ehdotukset voivat olla täsmällisempiä ja perustua kontekstiin johon uutta koodia ollaan juuri kirjoittamassa. Kuvassa 4.2 näkyy *VSCode*-editorin antamat ehdotukset erälle JavaScript- ja TypeScript-tiedostolle.

TypeScriptiä kirjoittaessa editori ymmärtää että `tuote.`-ilmaisun jälkeen ainoat järkevät ehdotukset ovat `Ostos`-tyyppisen muuttujan ominaisuuksien nimiä, eli että ohjelmoija haluaa hyvin suurella todennäköisyydellä kirjoittaa joko `tuote.hinta` tai `tuote.nimi`. Ehdotuksen voi hyväksyä helposti enteriä painamalla, jolloin ehdotettua koodinpätkää ei tarvitse kirjoittaa käsin.

Eksplisiittisesti kirjoitetut tyypit sekä editorin antama tieto muuttujien tyypeistä voivat toimia myös aiemmin kirjoitetun koodin dokumentaationa ja kuvauksena siitä, miten moduulia on tarkoitus käyttää. Ehdotukset toimivat eräänlaisena dokumentaation lähteenä, sillä ohjelmoija voi tutkia luokan tai paketin tarjoamaa sisältöä ehdotettuja nimiä selaamalla. Automaattisia ehdotuksia on mahdollista tarjota myös dynaamisesti tyyppitarkastetuille kielille, mutta koodipohjan kasvaessa ja muuttuessa monimutkaisemmaksi ehdotusten tarkkuus on vaikea pitää samalla tasolla kuin staattisesti tyyppitetyissä kielissä. Huonoimmillaan ehdotetut muuttuja- ja metodinimet valitaan yksinkertaisesti listaamalla avoimista tiedostoista löytyviä nimiä, välittämättä sen enempää siitä onko nämä metodit



Kuva 4.2: VSCode-editorin tarjoamat ehdotukset JavaScriptille (yllä) ja TypeScriptille (alla). JavaScriptille annetuissa ehdotuksissa on turhia, tiedostossa käytettyihin sanoihin perustuvia ehdotuksia.

määritetty juuri kyseiselle tyyppille. Edistyneemmät ehdotusmoottorit, kuten Visual Studioissa käytetty IntelliSense, suorittavat osaa JavaScript-koodista taustalla ja analysoivat siten muuttujien tyyppejä ajonaikana [18, 19]. Tämä tekniikka yhdistettynä tavanomaisempaan tyyppien käännoaikaiseen päättelyyn voi riittää tarjoamaan melko kattavan kuvauksen jonkin muuttujan tyylistä, mutta jää silti jälkeen siitä tarkkuudesta jonka IntelliSense osaa antaa staattisesti tyyhitetylle koodille.

Automaattisten ehdotusten vaikutuksesta ohjelmointityön tehokkuuteen ei kuitenkaan ole yleisesti hyväksyttyä, tutkittua varmuutta. Vaikka metodien nimet olisivatkin ohjelmoijan nähtävillä editorissa, ne eivät välttämättä sellaisenaan tarjoa tarpeeksi hyötyä dokumentaationa jotta työtehokkuus kasvaisi merkittävästi. Vuonna 2015 toteutettu tutkimus “An Empirical Investigation of the Effects of Type Systems and Code Completion on API Usability using TypeScript and JavaScript in MS Visual Studio” testasi staattisen tyyppityksen ja automaattisten ehdotusten tehokkuutta antamalla osallistujille toteutettavaksi ohjelmointitehtävän JavaScriptillä ja TypeScriptillä, automaattisten ehdotusten kanssa ja niitä ilman [20]. Tutkimuksen mukaan automaattiset ehdotukset eivät toisi tilastollises-

ti merkittävää parannusta ohjelmointitehtävän ratkomisnopeuteen. Samassa tutkimuksessa kuitenkin nähtiin että TypeScriptiä käyttäneet koehenkilöt suoriutuivat tehtävästä nopeammin, automaattisilla ehdotuksilla tai ilman. Voi olla, että automaattisia ehdotuksia tehokkaampi työkalu on itse kääntäjä, joka paljastaa virheet koodissa ennen kuin ohjelmoijan tarvitsee kokeilla koodin toimivuutta käytännössä.

Luku 5

Ongelmat JavaScriptin staattisessa tyypittämisessä

5.1 EcmaScript-yhteensopivuus

TypeScript pyrkii noudattamaan EcmaScript-spesifikaatiota mahdollisimman tarkasti kaikkien sellaisten ominaisuuksien suhteen jotka eivät nimenomaan liity staattiseen tyypittämiseen [21]. TypeScriptin kehityksen alkuvaiheissa, ennen EcmaScript 2015 -spesifikaation valmistumista, JavaScriptista kuitenkin puuttui joitain tärkeiksi katsottuja ominaisuuksia, jotka päätettiin lisätä TypeScriptiin mahdollisista yhteensopivuusongelmista huolimatta. TypeScriptissä on esimerkiksi syntaksi nimiavaruuden määrittämiseen, vaikka EcmaScriptiin myöhemmin lisätyt *moduulit* ajavat saman asian [22]. TypeScript tukee nykyään sekä alkuperäistä nimiavaruus-ominaisuuttaan että EcmaScriptin moduuleita.

Flow ja Closure-kääntäjä lisäävät koodiin ainoastaan staattista tyypitystä koskevia ominaisuuksia, kuten tyyppimäärittelyjä, joten niissä ei ole nimiavaruuksien kaltaisia koodin suoritukseen vaikuttavia ominaisuuksia. EcmaScript kuitenkin kehittyy nopeasti ja sen päälle rakentavien työkalujen on pysyttävä tahdissa mukana ollakseen hyödyllisiä kehittäjille.

Kaikki kolme työkalua pyrkivät tukemaan EcmaScriptin uusinta viimeisteltyä versiota. Lisäksi Flow tarjoaa tyyppitarkastusta joillekin kokeellisille ominaisuuksille joiden EcmaScript-määrittely ei vielä ole täysin valmis mutta jotka luultavasti tullaan lisäämään myöhemmin tuleviin määrittelyihin. Esimerkiksi *null-turvallinen ketjutus* (engl. optional

chaining tai safe navigation) [23] on vielä suunnitteluvaiheessa oleva kielen ominaisuus, mutta Flow tarjoaa jo staattisen tyyppitarkastuksen sille. Uusien ominaisuuksien aikaisessa käyttöönotossa on JavaScriptin kehityksen kannalta se hyvä puoli, että kehittäjäyhteisö pääsee kokeilemaan ja antamaan palautetta ennen kuin ominaisuuden määrittely on lyöty lukkoon. TypeScript puolestaan pyrkii vastedes implementoimaan ainoastaan valmiita ominaisuuksia, sillä keskeneräisen ominaisuuden yksityiskohdat tulevat suurella todennäköisyydellä muuttumaan useaan otteeseen suunnitteluvaiheen aikana ja sitä käyttäneet kehittäjät voivat myöhemmin joutua *refaktoroimaan* koodiaan.

5.2 Automaattinen ja vaiheittainen tyyppittäminen

Jotta staattisen tyyppityksen tuova työkalu olisi varteenotettava vaihtoehto dynaamisesti tyyppitetyn JavaScriptin rinnalla, sen kirjoittaminen ei voi vaatia liian paljon enemmän työtä kuin JavaScriptin. Staattisessa tyyppijärjestelmässä näkyvin ero dynaamisesti tyyppitettyyn on eksplisiittiset tyyppiannotaatiot, jotka voivat olla lisärasite koodin kirjoittajalle. Erityisesti vanhaa, dynaamisesti tyyppitettyä JavaScriptia refaktoroidessa staattisesti tyyppitettyyn muotoon on kätevää jos jokaista muuttujaa ja funktiota ei tarvitse muokata uuteen kieleen siirryttäessä.

TypeScript, Flow ja Cosure-kääntäjä tukevat melko pitkälle kehittyntä tyyppien automaattista päättelyä (engl. type inference).

```
1  const vertaaHintoja = (a, b) => a.hinta - b.hinta;  
2  tuotteet.sort(vertaaHintoja);
```

Listaus 5.1: Flow pystyy tulkitsemaan vertaaHintoja-funktion tyyppin automaattisesti, ilman eksplisiittisiä tyyppimäärittelyitä.

Esimerkissä 5.1, Flow pystyy päättämään tyyppin

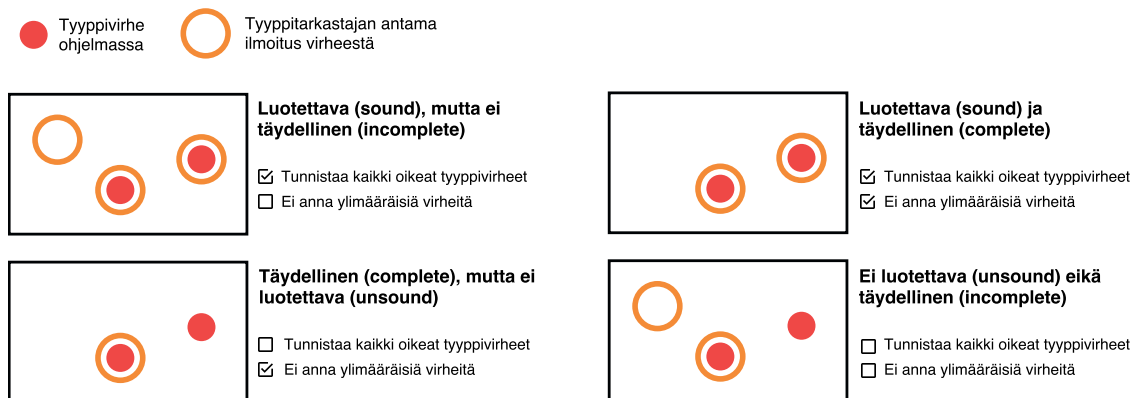
```
vertaaHintoja: (a: Ostos, b: Ostos) => number automaattisesti,
```

vaikkei esimerkissä ole yhtään eksplisiittistä tyyppimäärittelyä tai muuta tavallisesta

JavaScriptista poikkeavaa. Flow tietää ennestään mikä listan sort-metodin tyyppi on, joten se pystyy päättämään myös sort-metodille annetun vertaaHintoja-funktion tyyppin käyt-

tämällä *kutsumispaikkaan perustuvaa päättelyä* (engl. call-site inference). TypeScript ei tue kutsumispaikkaan perustuvaa päättelyä samalla tavalla kuin Flow, mikä onkin yksi isoimmista eroista näiden kahden työkalun välillä. Liian pitkälle viety tyyppien automaattinen päättely voi johtaa ongelmiin sekavien virheviestien tai työkalun hitauden muodossa, minkä vuoksi TypeScript vaatii nimettyjen funktioiden argumenteille aina eksplisiittiset tyypit. Kun funktion signatuuriin lisätään `(a: Ostos, b: Ostos)`, myös TypeScript pystyy automaattisesti päättelemään että funktion palautusarvo on numero, eikä eksplisiittistä `: number` palautusarvon määrittystä tarvita. Molempien työkalujen tapauksessa on hyvä huomata että tyyppien automaattinen päättely on viety paljon pidemmälle kuin se funktion sisäinen muuttujan tyyppin päättely jollaista nähdään esimerkiksi `var`-avainsanalla C#:issa ja Javassa.

5.3 Luotettavuus, täydellisyys ja käytännöllisyys



Kuva 5.1: Tyypijärjestelmän luotettavuus ja täydellisyys

Tyypijärjestelmän luotettavuus (engl. soundness) kuvaa sitä, kuinka suuren osan mahdollisista ohjelmointivirheistä se estää. Täysin luotettava (engl. sound) tyypijärjestelmä estää kaikki sellaiset virheet jotka sen on tarkoitus estää [24]. Täydellisyys (engl. completeness) puolestaan kertoo salliiko tyypijärjestelmä kaikki kielen sellaiset ominaisuudet jotka eivät olisi ajonaikana tyypivirheitä [17, 24].

Jotta JavaScriptiä analysoiva tyypijärjestelmä olisi luotettava, sen on annettava virhe

esimerkiksi seuraavasta ohjelmasta:

```
1 function osta(ostos) {  
2   lisääTuote({  
3     nimi: ostos.nimi,  
4     hinta: ostos.hinta  
5   });  
6 }  
7  
8 osta({ nimi: 'juusto', hinta: 5 });  
9 osta({ hinta: 5 });
```

Listaus 5.2: Virheellinen JavaScript-ohjelma: lisätyllä tuotteella ei ole nimeä.

Toisaalta jotta JavaScriptiä analysoiva tyyppijärjestelmä olisi täydellinen, sen on sallittava tämä korjattu versio ylläolevasta ohjelmasta:

```
1 function osta(ostos) {  
2   if (typeof ostos.nimi === 'string') {  
3     lisääTuote({  
4       nimi: ostos.nimi,  
5       hinta: ostos.hinta  
6     });  
7   }  
8 }  
9  
10 osta({ nimi: 'juusto', hinta: 5 });  
11 osta({ hinta: 5 });
```

Listaus 5.3: Toimiva JavaScript-ohjelma: virheelliseltä kutsulta on suojauduttu tarkistuksella.

Esimerkit 5.2 ja 5.3 toimivat odotetulla tavalla Flow:ssa. TypeScript vaatii eksplisiittisen tyyppiannotaation osta-funktiolle, mutta toimii muuten samalla tavalla. Flow, TypeScript ja Closure eivät kuitenkaan ole täydellisiä tai kokonaan luotettavia. Monimutkaisemmissa tilanteissa virheitä saattaa jäädä tunnistamatta tai toimiva ohjelma voidaan merkitä virheelliseksi.

JavaScriptiä käännöskohteena käyttävät mutta muuten sen syntaksista ja semantiikasta eroavat uudet kielet, kuten Dart, Elm ja ReasonML on voitu kehittää toivotunlaiseksi ilman painetta olla yhteensopiva vanhan koodin kanssa. TypeScript ja Flow on sen sijaan kehitetty lisäämään staattinen tyyppitys olemassa olevaan kieleen, JavaScriptiin, siten että nykyisellään käytössä olevat kirjastot ja koodikäytännöt pystytään tyyppitarkastamaan

ilman että niiden arkkitehtuuria tarvitsee merkittävästi muuttaa tyyppiturvallisuuden saavuttamiseksi.

TypeScriptin tyyppijärjestelmä on *rakennepohjainen* (engl. structural), koska sen katsottiin sopivan paremmin siihen tyyliin jolla JavaScriptiä tavallisesti käytetään. Rakennepohjaisessa tyyppijärjestelmässä keskitytään objektien muotoon eikä *nimelliseen* (engl. nominal) arvoon, minkä vuoksi myös seuraava koodi kääntyy ilman tyyppivirheitä.

```
1 class Ihminen {  
2     constructor(public nimi: string){}  
3 }  
4 class Eläin {  
5     constructor(public nimi: string){}  
6 }  
7 function varaaEläinlääkäri(omistaja: Ihminen, lemmikki: Eläin){  
8  
9     varaaEläinlääkäri(new Eläin("Musti"), new Ihminen("Jaakko"));
```

Listaus 5.4: Loogisen virheen sisältävä, mutta ilman varoituksia kääntyvä TypeScript-ohjelma.

TypeScript-kääntäjä sallii esimerkin 5.4 koodin vaikka argumentit "omistaja" ja "lemmikki" ovat väärin päin, sillä molempien luokkien rakenne on sama; molemmissa on pelkkä tekstimuotoinen ominaisuus "nimi". Flow:ssa sama virhe ei menisi läpi. Siinä luokkainstanssit on tyyhitetty nominaalisesti, mikä auttaa tässä esimerkissä mutta aiheuttaa ongelmia muissa tilanteissa. Projekti saattaa esimerkiksi sisältää kaksi versiota samasta kirjastosta jonkin toisen kirjaston kautta, mikä voi aiheuttaa yhteensopimusergelmiä kun käytännössä saman luokan tyyppejä ei lueta keskenään yhteensopiviksi.

Luku 6

Yhteenveto

Staattinen tyypitys jakaa mielipiteitä. Facebook on kehittänyt staattiset tyyppijärjestelmät myös *Pythonin* (1990) ja *PHP:n* (1995) analysointiin [25, 26]. Dynaamisesti tyyplitetyn *Clojuren* (2007) kehittäjä Rich Hickey on puolestaan otteeseen kritisoinut staattista tyyppitystä useaan otteeseen [27]. Eksplisiittiset tyyppimäärittelyt vaativat lisää kirjoitettavaa koodia ja liian tiukka tyyppijärjestelmä voi rajoittaa sitä mitä kielellä voi tehdä, sillä harva tyyppijärjestelmä on täydellinen (engl. complete). JavaScriptissä on useita yleisesti käytettyjä rajapintoja jotka ovat hyödyllisiä mutta vaikea tyyppittää staattisesti. Esimerkiksi suositusta kirjastosta *lodash* löytyy funktio `get` [28], jota voidaan kutsua seuraavasti

```
1 import {get} from 'lodash';
2
3 const object = { a: [{ b: { c: 3 } }] };
4 get(object, 'a[0].b.c'); // Palauttaa numeron 3
```

Listaus 6.1: `get`-funktioilla voidaan palauttaa arvo syvältä objektin sisältä välittämättä mahdollisesti puuttuvista arvoista.

Staattisen tyyppijärjestelmän on vaikea päätellä esimerkin `get`-kutsun palautusarvo. Ohjelmoija joutuu tällaisessa tilanteessa joko luopumaan tyyppiturvallisuudesta tässä osassa koodia tai kirjoittamaan jonkin huomattavasti monimutkaisemman version säilyttääkseen tyyppiturvallisuuden.

Dynaamisen koodin nopeasta kirjoitustahdista saatavat hyödyt jäävät kuitenkin vähäiseksi jos lopputuotos ei toimi odotetulla tavalla. Bugit heikentävät käyttäjien tyytyväisyyttä ohjelmaan ja voivat pahimmillaan aiheuttaa sellaista vahinkoa että koko bugisen ohjel-

man julkaisusta saatu nettohyöty on negatiivinen, eli sen käyttöönotto aiheuttaa enemmän haittaa kuin hyötyä. Staattinen tyyppitys ohjaa kirjoitettua koodia turvalliseen suuntaan kehitysvaiheen alusta loppuun, ja torjuu tietynlaisia ohjelmointivirheitä tehokkaammin kuin esimerkiksi ajonaikaista käyttäytymistä testaavat *unit testit*. Esimerkissä 6.1 esitelty get-kutsu on yksinkertainen ja helppolukuinen, mutta jos muuttujan `object` tyyppiä myöhemmin muutetaan toiseen muotoon muistamatta päivittää myös get-kutsua, virheellisestä get-kutsusta voi muodostua ohjelmaan hankala bugi.

Flow, TypeScript ja Closure sallivat sekä dynaamisesti että staattisesti tyyppitetyn koodin käytön ja hämärtävät rajaa niiden välillä. Jää ohjelmoijan päätettäväksi onko yllä mainitun get-kutsun yksinkertaisuus tyyppiturvattomuuden arvoista. JavaScript-kehityksessä hyväksi todetut suunnittelumallit ovat edelleen käytettävissä tyyppiannotoidussakin koodissa, vaikka välillä tyyppiturvallisuutta olisikin sen vuoksi höllättävä. Lopputulos ei ole ainakaan sen turvattomampaa kuin normaali JavaScript-koodikaan ja tyyppiturvaton osa koodia voidaan usein rajata pieneksi, muilla tavoin testatuksi osa-alueekseen muuten staattisesti tarkastetussa kokonaisuudessa. Samankaltaisuus ja yhteensopivuus tavallisen JavaScriptin kanssa onkin näiden työkalijen tärkein etu muihin staattisesti tyyppitettyihin kieliin nähden. JavaScript projektit on mahdollista muuttaa vaiheittain staattisesti tyyppitetyksi kirjoittamatta koko ohjelman koodia alusta asti uudestaan, eikä ohjelmoijan itsensä tarvitse korvata kaikkea JavaScriptista oppimaansa uuden kielen tavoilla ja yhteisöllä.

Lähdeluettelo

- [1] Transition to OO programming - Safety and strong typing. URL <http://www.cs.cornell.edu/courses/cs1130/2012sp/1130selfpaced/module1/module1part4/strongtyping.html>.
- [2] JavaScript language resources. URL https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Language_Resources.
- [3] Standard ECMA-262 - ECMAScript 2017 Language Specification. URL <https://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-262.htm>.
- [4] TypeScript Language Specification. URL <https://github.com/Microsoft/TypeScript/blob/b8fbf884d0f01c1a20bb921cc0a65d6c1a517ee8/doc/TypeScript%20Language%20Specification.pdf>, versio 1.8.
- [5] Installing and setting up Flow for a project. URL <https://flow.org/en/docs/install/>.
- [6] Closure Compiler. URL <https://developers.google.com/closure/compiler/>.
- [7] Annotating JavaScript for the Closure Compiler. <https://github.com/google/closure-compiler/wiki/Annotating-JavaScript-for-the-Closure-Compiler>.

-
- [8] Anders Hejlsberg. Microsoft Build 2014. TypeScript, maaliskuu 2014. URL <https://channel9.msdn.com/Events/Build/2014/3-576>.
- [9] Shriam Rajagopalan Erik Wittern, Philippe Suter. A Look at the Dynamics of the JavaScript Package Ecosystem. 2016.
- [10] DefinitelyTyped – repositorio TypeScript tyypitystiedostoille. URL <https://github.com/DefinitelyTyped/DefinitelyTyped>.
- [11] flow-typed – repositorio Flow tyypitystiedostoille. URL <https://github.com/flow-typed/flow-typed>.
- [12] Flowgen – kääntäjä TypeScriptist-tyypitystiedostoista Flow-tyypitystiedostoiksi, 2016. URL <https://github.com/joarwilk/flowgen>.
- [13] Clutz – kääntäjä Closure-tyypitystiedostoista TypeScript-tyypitystiedostoiksi, 2016. URL <https://github.com/angular/clutz>.
- [14] Tsickle – kääntäjä TypeScriptistä Closureksi, 2014. URL <https://github.com/angular/tsickle>.
- [15] Ecma International. *ECMA-262 Section 12.8.3*, kesäkuu 2017. URL <https://www.ecma-international.org/ecma-262/8.0/index.html#sec-additive-operators>, versio 8.0.
- [16] Earl T. Barr Zheng Gao, Christian Bird. To Type or Not to Type: Quantifying Detectable Bugs in JavaScript. 2017.
- [17] Benjamin C. Pierce. *Types and Programming Languages*. The MIT Press, 2002.
- [18] Previewing Salsa – the New JavaScript Language Service in Visual Studio "15", huhtikuu 2016. URL <https://blogs.msdn.microsoft.com/visualstudio/2016/04/08/previewing-salsa-javascript-language-service-visual-studio-15/>.

- [19] JavaScript Language Service in Visual Studio, tammikuu 2017.
URL <https://github.com/Microsoft/TypeScript/wiki/JavaScript-Language-Service-in-Visual-Studio#unsupported-patterns>.
- [20] Stefan Hanenberg Lars Fischer. An Empirical Investigation of the Effects of Type Systems and Code Completion on API Usability using TypeScript and JavaScript in MS Visual Studio. lokakuu 2015.
- [21] TypeScript Design Goals, syyskuu 2014. URL <https://github.com/Microsoft/TypeScript/wiki/TypeScript-Design-Goals>.
- [22] Ryan Cavanaugh. Kommentti TypeScript-ominaisuusehdotuksessa Suggestion: "safe navigation operator", i.e. x?.y, lokakuu 2014. URL <https://github.com/Microsoft/TypeScript/issues/16#issuecomment-57645069>.
- [23] Gabriel Isenberg Claude Pache. Optional Chaining for JavaScript, 2018. URL <https://github.com/tc39/proposal-optional-chaining>.
- [24] CSE341: Programming Languages Winter 2013 Unit 6 Summary, 2013. URL <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse341/13wi/unit6notes.pdf>.
- [25] Pyre-tyyppitarkastaja Python-kielelle. URL <https://github.com/facebook/pyre-check>.
- [26] PHP-kieleen pohjautuva Hack-kieli. URL <https://github.com/facebook/hhvm/tree/master/hphp/hack>.
- [27] Video: Effective Programs - 10 Years of Clojure - Rich Hickey, 2017. URL <https://www.youtube.com/watch?v=2V1FtfBDsLU>.

-
- [28] Lodash-kirjaston dokumentaatio - get-funktio. URL <https://lodash.com/docs/4.17.11#get>.