JavaScriptin staattinen tyypittäminen

LuK -tutkielma
Turun yliopisto
Tulevaisuuden teknologioiden laitos
Tietojenkäsittelytiede
2019
Oskari Noppa

Sisältö

Luku 1
Johdanto

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

Tässä tutkielmassa käsitellään JavaScript-ohjelmointikieltä, sekä kolmea työkalua jotka rakentavat staattisesti tarkastettavan tyyppijärjestelmän JavaScriptin päälle. JavaScriptin 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 tarkoitusperää suuremmaksi, kun sillä on alettu toteuttaa esimerkiksi kartta-, kirjoitus- ja hallintapalveluita jotka toimivat selaimessa, siten ettei käyttäjän tarvitse asentaa erillistä tietokoneohjelmaa palvelun käyttöön. JavaScriptin käyttö on levinnyt verkkosivujen asiakaspuolen käyttöliittymän toteutuksesta tietokone- ja älypuhelinsovelluksiin sekä verkon asiakas-palvelin-arkkitehtuurissa myös palvelinsovelluksien kieleksi.

Tutkielmassa esitellään TypeScript, Flow ja Closure-kääntäjä, joista jokainen on tarkoitettu työkaluksi sellaisten ohjelmien kehittämiseen, jotka muuten kehitettäisiin JavaScriptillä. Päämääränä on tarkastella kuinka *dynaamisesti tyypitetty* JavaScript voidaan täydentää staattisesti tyyppitarkastetuksi TypeScriptin, Flown, tai Closure-kääntäjän avulla, sekä mitä hyötyä siitä voi olla. Työkalujen hyötyjä ja haittoja vertaillaan sekä toi-

siinsa että tavalliseen JavaScript-koodiin.

Luku 2
Peruskäsitteitä

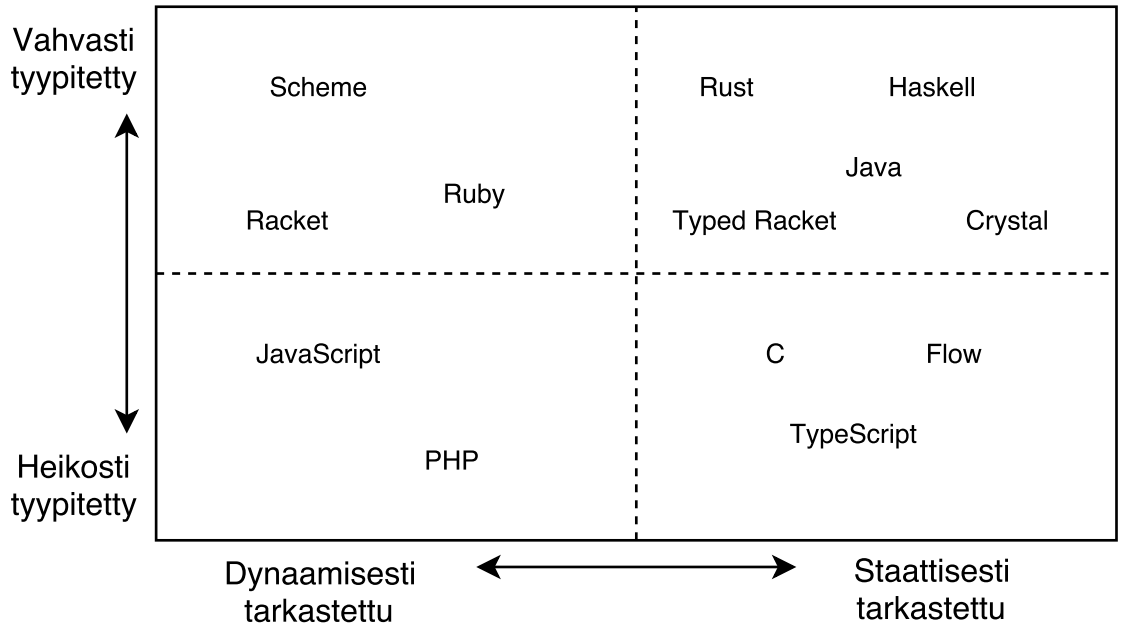
2.1 Tyyppijärjestelmät

Tyyppijärjestelmät, tai *tyyppiteoria*, on tutkimusalue matematiikan ja filosofian alalla [1]. Tarkka "tyyppijärjestelmän" määritelmä riippuu siitä minkä tieteenalan ja -haaran näkökulmasta sitä käsitellään. Tässä tutkielmassa tyyppijärjestelmiä tarkastellaan käytännönläheisesti ohjelmointikielten näkökulmasta metodina, jolla voidaan osoittaa virheellisissä ohjelmissa olevia puutteita luokittelemalla ohjelman rakenteita tyypeiksi ja vertaamalla niitä ohjelmointikielen tyyppisääntöjä vasten.

2.2 Luokittelu

Ohjelmointikielten tyyppijärjestelmien jakaminen staattisesti ja dynaamisesti tyyppitarkastettuihin (puhekielessä usein: staattisesti ja dynaamisesti "tyypitettyihin") perustuu ohjelman kehitysvaiheeseen, jossa tarkastaminen tapahtuu. Staattisella tyyppitarkastamisella viitataan ohjelman tyyppien analyysiin ennen ohjelman suorittamista, esimerkiksi käännösaikana, kun taas dynaaminen tyyppitarkastus varmistaa arvojen tyyppien oikeellisuuden ohjelmaa suoritettaessa.

Esimerkiksi ohjelma `"teksti".potenssiin(3)` antaa staattisesti tyyppitarkastetussa kielessä virheen jo käännösaikana, mikäli metodia `potenssiin` ei ole tekstityyppisille arvoille määritetty. Staattisesti tyyppitarkastetussa kielessä muuttujien mahdolliset tyypit analysoidaan käännösaikana, ennen ohjelman suorittamista. Kääntäjä nä-



Kuva 2.1: Tyyppijärjestelmät eri ohjelmointikielissä

kee, että lausekkeen vasen puoli, `"teksti"`, on tyypiltään teksti ja oikea puoli on metodin `potenssiin` kutsu. Kääntäjä voi todeta kielen tyyppisääntöjen perusteella, ettei tekstimuotoisessa arvossa ole metodia "potenssiin" ja pysäyttää virheellisen ohjelman käsittelyn.

Tyyppijärjestelmät voidaan jaotella myös muiden ominaisuuksien perusteella esimerkiksi vahvoihin ja heikkoihin tyyppijärjestelmiin. Näiden termien merkitys ei ole tarkasti määritelty, mutta yleisesti niillä viitataan tapaan, jolla kieli käsittelee tarkoitetusta poikkeavat, virheelliset tyypit [2]. Vahvasti tyypitetyssä kielessä tietyntyyppisen muuttujan vääränlainen käsittely aiheuttaisi käännös- tai ajonaikaisen virheen, kun taas heikosti tyypitetyssä kielessä arvolle voitaisiin tehdä implisiittisiä tyyppimuunnoksia niiden yhteensopivuuden saavuttamiseksi.

JavaScript on dynaamisesti tarkastettu, heikosti tyypitetty kieli. JavaScriptiä suorittava ympäristö hyväksyisi ohjelman ja sallisi sen suorittamisen. Virhe olemattoman metodin kutsumisesta ilmenisi vasta jos ohjelmaa testataan käytännössä ja kyseinen virheen sisältävä osa koodia suoritetaan. Lisäksi esimerkiksi lausekkeen `"teksti" + 2` laskeminen ei aiheuttaisi virhettä edes suoritusaikana, sillä heikoille tyyppijärjestelmille ominai-

sesti JavaScript muuttaisi numeron 2 tekstimuotoon ennen summausoperaation arviointia ja antaisi tulokseksi `"teksti2"`, mikä ei välttämättä ollut koodin alkuperäinen tarkoitus. Tässä tutkielmassa keskitytään lähinnä JavaScriptin tyyppien staattiseen ja dynaamiseen, eli käytännössä käännös- ja ajonaikaiseen tarkastamiseen. Eräät esitellyistä työkaluista myös
tiukentavat kielen sallimia operaatioita siten, että esimerkiksi yllä esitettyä
`"teksti" + 2` lauseketta ei enää sallittaisi.

2.3 EcmaScript ja JavaScript

EcmaScript on ECMA-262 standardin määrittelemä ohjelmointikieli [3, 4], jonka kehityksestä vastaa organisaatio Ecma International. *JavaScript* puolestaan on Oraclen omistama tavaramerkki jolla viitataan EcmaScript-kielen osittaisiin tai täydellisiin toteutuksiin [3]. Historiallisista syistä termejä “JavaScript” ja “EcmaScript” käytetään usein keskenään vaihtokelpoisesti. Tässä tutkielmassa termillä “JavaScript” viitataan ECMA-262-spesifikaation kahdeksannen version mukaiseen EcmaScriptiin, jota kutsutaan myös nimellä EcmaScript 2017.

2.4 TypeScript

TypeScript on Microsoftin luoma ohjelmointikieli, jonka tarkoitus on auttaa JavaScript-ohjelmien kehitystä staattisen tyyppijärjestelmän avulla. Se on EcmaScriptin ylijoukko (engl. superset) [5] ja jatkaa JavaScriptin syntaksia tyyppimäärittelyihin käytettävällä annotaatiosyntaksilla. Jokainen validi JavaScript-ohjelma on syntaksiltaan ja ajonaikaiselta 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 suoritusympäristöissä. TypeScript-kääntäjän voi myös määrittää muokkaamaan tulostettava koodi yhteensopivaksi vanhojen EcmaScript-standardien

kanssa, mikä on hyödyllistä, jos ohjelman on tarkoitus tukea sellaisia suoritusympäristöjä, jotka eivät tue uusinta EcmaScriptin versiota.

2.5 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 tyyppimääritykset 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 [6].

2.6 Closure

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 [7]. Tyypit annotoidaan erityisellä JSDoc-pohjaisilla dokumentaatiokommenteilla. Koska annotaatiot ovat kommenteissa eivätkä erityisenä syntaksina muun suoritettavan koodin joukossa, Closure-annotoitua JavaScriptiä ei tarvitse kääntää ennen sen suorittamista [8]. Kehittäjä voi suorittaa koodin sellaisenaan ilman aikaavievää käännösprosessia. Kun ohjelma on valmis, se voidaan haluttaessa ajaa Closure-kääntäjän läpi tiedostokoon ja suoritusnopeuden optimoinniksi.

Luku 3

Käyttöönotto

3.1 Tyyppiannotaatiot

Tyyppijärjestelmä voi päätellä muuttujan sallitun tyypin automaattisesti tai kielen syntaksin tarjoamien eksplisiittisten tyyppimäärittelyjen perusteella. Kaikki kolme tässä tutkielmassa esiteltyä JavaScriptin staattiseen tyyppitarkastukseen tarkoitettua työkalua päättelevät muuttujien tyyppejä automaattisesti, mutta vaativat paikoitellen myös eksplisiittisiä määrityksiä. Closure-kääntäjä lukee tyyppimääritykset JSDoc-tyylisistä dokumentaatiokommenteista [8].

```
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 kommenteilla, 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 yhteensopimattoman tavallisen JavaScriptin kanssa. Ohjelma on käännettävä JavaScriptiksi en-

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

Listaus 3.2: Esimerkki Flow tai TypeScript annotaatiosta funktiolle

nen 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 kommenteissa voi olla runsassanaista ja hankalaa, mikä kasvattaa niiden kirjoittamiseen vaadittua työmäärää [5, 9].

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;
```

Listaus 3.3: Uuden tyypin määrittely Closuren kommenttisyntaksilla

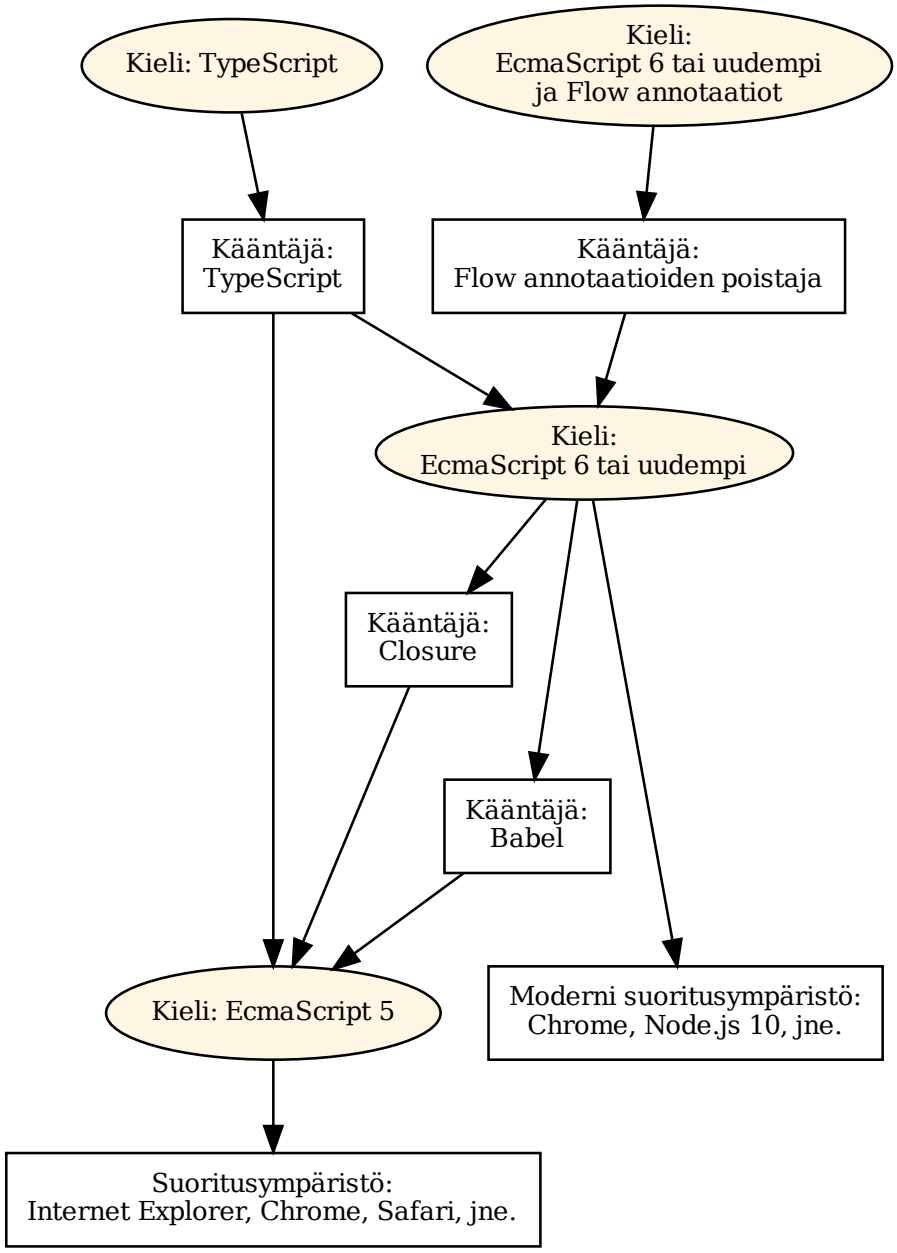
TypeScript ja Flow tarjoavat käännösaikaisen tyypin (type alias) määrittelyyn tiiviimmän ja helppolukuisemman syntaksin [5]:

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

Listaus 3.4: Uuden tyypin määrittely TypeScriptissa tai Flow'ssa

Tällainen tyypin määritteleminen vaikuttaa ainoastaan käännösvaiheen tyyppitarkastukseen, eikä määrittely tuota tietorakenteita tai muuta sisältöä suoritettavaan JavaScript-ohjelmaan.

3.2 Käännösprosessi



Kuva 3.1: Vaihtoehtoisia käännösprosesseja

JavaScriptillä kirjoitettua koodia ei tavallisesti tarvitse erikseen kääntää ennen suoritusvaihetta. JavaScriptiä suorittava ohjelma, esimerkiksi selain, tulkkaa EcmaScript-standardin mukaista koodia sellaisenaan tai *JIT-kääntää* sen optimoituun muotoon automaattisesti suorituksen ohessa. TypeScript- tai Flow-annotoitu koodi ei kuitenkaan ole

validia JavaScriptiä, eikä selain tai muu JavaScriptia suorittamaan suunniteltu ohjelma tavallisesti osaa sellaista koodia käsitellä. Näinollen TypeScript tai Flow-annotoitu koodi on välttämätöntä kääntää muotoon jossa annotaatiot on poistettu ja jäljellä on enää standardinmukainen JavaScript.

Kääntämisen tarve vaikuttaa ohjelman kehitysprosessiin. 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 sellaisenaan 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. Käännösvaiheen tarpeellisuus ja vaikutus kehitysprosessiin riippuu käytetystä kielestä, EcmaScript versiosta ja siitä missä ympäristöissä sitä halutaan suorittaa. Esimerkiksi Internet Explorer tukee ainoastaan EcmaScriptin vanhaa viidettä versiota (2011). Jos koodi kirjoitetaan kaikkiin suoritusympäristöihin soveltuvalla kielen versiolla, 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 ohjelmistoekosysteemeistä [10]. Tämän tutkielman kirjoittamisen hetkellä rekisterin kotisivu, npmjs.com, ilmoitti julkisesti saatavilla olevien pakettien määräksi yli 800 000. Avoi-

messa jakelussa olevien kirjastojen lisäksi JavaScriptiä käyttävillä 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 tyyppiannotoidulla 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 tyyppimäärittelystä, 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 3.5: 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); // Expected 1 arguments, but got 2
```

Listaus 3.6: JavaScript-koodin kutsuminen TypeScript tiedostosta tuotesivu.ts

JavaScript-kirjaston kehittäjä voi tarjota erillisen tyypitystiedoston kirjastonsa lähdekoodin mukana, tai muut kirjastoa käyttävät kehittäjät voivat oma-aloitteisesti luoda sellaisen tyypitystiedostoja keräävään julkaisuarkistoon (engl. repository). TypeScriptin tyypitys-

tiedostoille on *DefinitelyTyped* [11] ja Flowlle vastaavasti *flow-typed* [12]. 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) [13], *clutz* (Closure-tyypitykset TypeScript-tyypityksiksi) [14] ja *tsickle* (TypeScript-annotoitu koodi Closure-annotoiduksi) [15]. Joitain perustavanlaatuisia eroja työkalujen välillä voi silti olla vaikea tai mahdotonta siirtää tyyppijärjestelmästä toiseen tekemättä kompromisseja. TypeScriptissä esimerkiksi kaikki *enumeja* lukuunottamatta on *rakenteellisesti* (engl. structural) tyypitetty, kun taas Flow'ssa esimerkiksi luokkien instanssien tyyppejä 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 rakelteeltaan samanlaisia ja käsitellään siksi TypeScriptissä kuin ne olisivat sama luokka, mutta Flow'ssa 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 Closuren tarjoamalla tyyppijärjestelmällä. Kaikkien kolmen työkalun tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluu tuki vaiheittaiselle käyttöönotolle, eli käytännössä yhteenspivuus täysin tyyppitarkastamattoman koodin kanssa. Sekä Flow että TypeScript tarjoavat erityisen yleisviittaustyypin Any, jota voi käyttää kuvaamaan mitä tahansa JavaScript arvoa [5]. Any-tyyppiseen muuttujaan voidaan asettaa mikä

tahansa arvo ja Any tyyppinen arvo voidaan asettaa mihin tahansa muuttujaan tai funktioparametriin. Any tyypin 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.

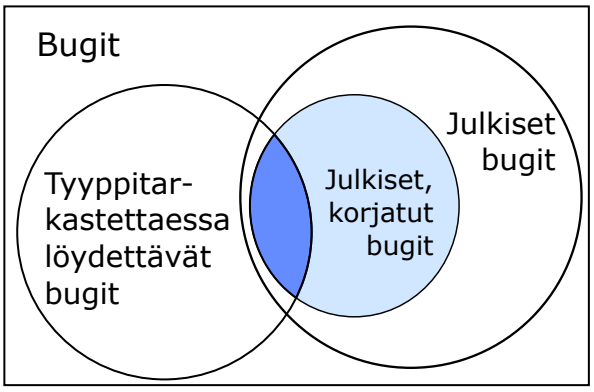
Luku 4

Staattisen tyypityksen hyödyt

4.1 Virheiden havaitseminen

Kenties tärkein staattisen tyyppijärjestelmän tehtävä on havaita ja estää ohjelmoijan virheitä. Tyyppisäännöt 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 esiteltyä 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` [16]. Käännösaikaisen tarkistami-



Kuva 4.1: To Type or Not to Type: Quantifying Detectable Bugs in JavaScript -tutkimuksen käsittelemät bugit [17].

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

Vuonna 2017 tehdyssä tutkimuksessa TypeScriptin ja Flown vaikutuksesta avoimen lähdekoodin JavaScript-projekteihin havaittiin, että vähintään 15% ilmoitetuista ja korjatuista bugeista olisi voitu havaita ja välttää jos projektin kehitykseen oltaisin käytetty jompaakumpaa näistä työkaluista [17]. 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 tyypitettyyn 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 tyyppiannotoituna kaikki kolme työkalua pystyvätkin osoittamaan esimerkissä olevan virheen.

4.2 Ohjelman optimointi käännösvaiheessa

Aivan ensimmäiset tyyppijärjestelmät, kuten Fortranin (1957) staattinen tyypitys, kehitettiin laskutoimitusten suoritusajan optimointia varten [1]. Myös uudemmissa kielissä muuttujien tyypeistä saatavilla olevaa tietoa voidaan käyttää ajonaikaisen turvallisuuden varmistavien tarkistusten optimointiin.

Kun JavaScriptiä optimoidaan käännösvaiheessa, on kuitenkin usein hyödyllistä kiinnittää enemmän huomiota tuotetun koodin kokoon kuin suoritusaikaiseen 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 tyypityksen 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).

```
1  class HintaLaskuri {
2    constructor() {
3      this.ostostenHintaYhteensa = 0
4      this.arvonlisavero = 0.14
5    }
6    lisaaTuote(hinta) {
7      this.ostostenHintaYhteensa += hinta
8    }
9    yhteensa() {
10     return this.ostostenHintaYhteensa +
11       this.ostostenHintaYhteensa * this.arvonlisavero
12   }
13 }
14 const laskuri = new HintaLaskuri()
15 laskuri.lisaaTuote(5)
16 console.log(laskuri.yhteensa())
```

Listaus 4.2: Esimerkki JavaScript-koodista jota Closure osaa optimoida

Esimerkissä 4.2 on yksinkertainen JavaScript-tiedosto, jota Closure voi optimoida kooltaan pienemmäksi ja ajonaikaiselta suorituskyvyltään nopeammaksi.

```
1 var $laskuri$$=new function(){this.$a$=0};
2 $laskuri$$.$a$+=5;
3 console.log($laskuri$$.$a$+.14*$laskuri$$.$a$);
```

Listaus 4.3: Closuren optimoima JavaScript-koodi

Listauksessa 4.3 näkyy Closuren (versio 20190215.0.2) tuottama koodi. Pitkä luokkamuuttuja `ostostenHintaYhteensa` on uudelleennimetty lyhyeen muottoon. Closure näkee että metodeja kutsutaan vain yhdessä kohdassa koodia, joten se on poistanut metodit ja korvannut niiden kutsupaikat koodilla joka alun perin oli metodin sisällä (engl. function inlining). `arvonlisavero`-luokkamuuttuja on poistettu kokonaan ja korvattu käyttöpaikalla `.14` *numeroliteraalilla*, mikä paitsi pienentää koodin kokoa myös saattaa parantaa suorituksenaikaista tehokkuutta, sillä koodia suorittavan moottorin ei tarvitse noutaa `arvonlisavero`-luokkamuuttujaa luokan *instanssista*. Käännöksen tulos on vaikeasti luettavaa, mutta se onkin tarkoitettu JavaScript-moottorin suoritet-

tavaksi eikä ohjelmoijan luettavaksi. Ongelmatilanteissa, lopullista koodia tutkittaessa ja "debugattaessa", käännetty koodi voidaan palauttaa alkuperäiseen muotoonsa ohjelmoijan luettavaksi käyttämällä *lähdekarttoja* (engl. source map) [18, 19].

4.3 Tyyppimäärittelyt 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 ovat täsmällisempiä ja perustuvat kontekstiin johon uutta koodia ollaan juuri kirjoittamassa. Kuvassa 4.2 näkyy *VSCode*-editorin antamat ehdotukset eräille JavaScript- ja TypeScript-tiedostoille. 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 tyypitetyissä kielissä. Huonoimmillaan ehdotetut muuttuja- ja metodinimet valitaan yksinkertaisesti listaamalla

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

avoimista tiedostoista löytyviä nimiä, välittämättä sen enempää siitä onko nämä metodit määritetty juuri kyseiselle tyypille. Edistyneemmät ehdotusmoottorit, kuten Visual Studiossa käytetty IntelliSense, suorittavat osaa JavaScript-koodista taustalla ja analysoivat siten muuttujien tyyppejä ajonaikana [20, 21]. Tämä tekniikka yhdistettynä tavanomaisempaan tyyppien käännösaikaiseen päättelyyn voi riittää tarjoamaan melko kattavan kuvauksen jonkin muuttujan tyypistä, mutta jää silti jälkeen siitä tarkkuudesta jonka IntelliSense osaa antaa staattisesti tyypitetylle 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 tyypityksen ja automaattisten ehdotusten tehokkuutta antamalla osallistujille toteutettavaksi ohjelmointitehtävän JavaScriptillä ja TypeScriptillä, automaattisten ehdotusten kanssa ja

niitä ilman [22]. Tutkimuksen mukaan automaattiset ehdotukset eivät toisi tilastollisesti 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 [23]. TypeScriptin kehityksen alkuvaiheissa, ennen EcmaScript 2015 -spesifikaation valmistumista, JavaScriptista kuitenkin puuttui joitain tärkeiksi katsottuja ominaisuuksia, jotka päätettiin lisätätä TypeScriptiin mahdollisista yhteensopivuusongelmista huolimatta. TypeScriptissä on esimerkiksi syntaksi nimiavaruuden määrittämiseen, vaikka EcmaScriptiin myöhemmin lisätyt *moduulit* ajavat saman asian [24]. 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) [25] 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 tyypittäminen

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

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

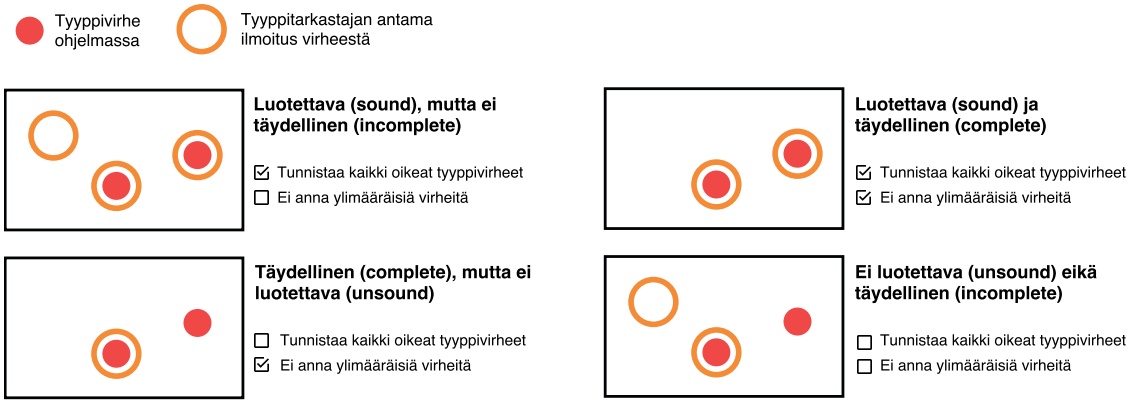
```
1  const vertaaHintoja = (a, b) => a.hinta - b.hinta;
2  tuotteet.sort(vertaaHintoja);
```

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

Esimerkissä 5.1, Flow pystyy päättelemään tyypin `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 päättelemään myös sort-metodille annetun vertaaHintoja-funktion tyypin 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 määritystä tarvita. Molempien työkalujen tapauksessa on hyvä huomata että tyyppien automaattinen päättely on viety paljon pidemmälle kuin se funktion sisäinen muuttujan tyypin päättely jollaista nähdään esimerkiksi `var`-avainsanalla C#:issa ja Javassa.

5.3 Luotettavuus, täydellisyys ja käytännöllisyys



Kuva 5.1: Tyyppijärjestelmän luotettavuus ja täydellisyys

Tyyppijärjestelmän luotettavuus (engl. soundness) kuvaa sitä, kuinka suuren osan mahdollisista ohjelmointivirheistä se estää. Täysin luotettava (engl. sound) tyyppijärjestelmä estää kaikki sellaiset virheet jotka sen on tarkoitus estää [26]. Täydellisyys (engl. completeness) puolestaan kertoo salliiko tyyppijärjestelmä kaikki kielen sellaiset ominaisuudet jotka eivät olisi ajonaikana tyyppivirheitä [1, 26].

Jotta JavaScriptiä analysoiva tyyppijärjestelmä 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 tyypitys 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 arugmentit "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 tyypitetty nominaalisesti, mikä auttaa tässä esimerkissä mutta aiehuttaa ongelmia muissa tilanteissa. Projekti saattaa esimerkiksi sisältää kaksi versiota samasta kirjastosta jonkin toisen kirjaston kautta, mikä voi aiheuttaa yhteensopimusongelmia 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 [27, 28]. Dynaamisesti tyypitetyn *Clojuren* (2007) kehittäjä Rich Hickey on puolestaan kritisoinut staattista tyypitystä useaan otteeseen [29]. 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 vaikeita tyypittää staattisesti. Esimerkiksi suositusta kirjastosta *lodash* löytyy funktio `get` [30], jota voidaan kutsua seuraavasti

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

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

Staattisen tyyppijärjestelmän on vaikea päätellä esimerkin get-kutsun palautusarvo tai tarkistaa toisen argumentin oikeellisuus. Ohjelmoija joutuu joko luopumaan tyyppiturvallisuudesta tässä osassa koodia tai kirjoittamaan jonkin huomattavasti monimutkaisemman version säilyttääkseen tyyppiturvallisuuden.

Dynaamisen koodin nopeasta kirjoitustahdista saatavat hyödyt jäävät kuitenkin vähäisiksi 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 tyypitys 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, TypeScirpt ja Closure sallivat sekä dynaamisesti että staattisesti tyypitetyn 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 työkalujen tärkein etu muihin staattisesti tyypitettyihin kieliin nähden. JavaScript projektit on mahdollista muuttaa vaiheittain staattisesti tyypitetyksi kirjoittamatta koko ohjelman koodia alusta asti uudestaan, eikä ohjelmoijan itsensä tarvitse korvata kaikkea JavaScriptista oppimaansa uuden kielen tavoilla ja yhteisöllä. Closuren JSDoc-tyyliset kommentit saattavat jo ollakin JavaScript-ohjelmoijalle tuttuja, sillä niitä käytetään usein koodin dokumentointiin vaikka tyyppien oikeellisuutta ei tarkastettaisikaan Closurella. Myös TypeScirpt- ja Flow-annotaatiot voivat helpottaa uusien JavaScript-ohjelmoijien tutustumista uuteen projektiin tuomallaan dokumentaatioarvolla.

Samankaltaisuus ja yhteensopivuus jo ennestään suositun JavaScriptin kanssa yhdistettynä tyyppiturvallisuuteen, koodin kirjoittamista helpottaviin työkaluihin ja selkeämmin dokumentoituun koodiin ovat nostaneet erityisesti TypeScirptin käytön nopeaan kasvuun. Vuosittaisessa JavaScript-yhteisölle tarkoitetussa *State Of JS* kyselytutkimuksessa

46.7% vuonna 2018 vastanneista ilmoitti käyttäneensä TypeScriptiä ja haluavansa käyttää sitä uudestaan [31]. Vielä vuonna 2016 luku oli 21% [32]. TypeScirpt ja JavaScriptin staattinen tyypitys näyttävät kasvattavan suosiotaan myös tulevaisuudessa. Vuoden 2018 State Of JS kyselyyn vastanneista 33.7% vastasi haluavansa
opetella TypeScriptiä ja 34.5% Flow'ta.

Lähdeluettelo

[1] Benjamin C. Pierce. *Types and Programming Languages*. The MIT Press, 2002.

[2] Transition to OO programming - Safety and strong typing. URL http://www.cs.cornell.edu/courses/cs1130/2012sp/1130selfpaced/module1/module1part4/strongtyping.html.

[3] JavaScript language resources. URL https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Language_Resources.

[4] Standard ECMA-262 - ECMAScript 2017 Language Specification. URL https://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-262.htm.

[5] TypeScript Language Specification. URL https://github.com/Microsoft/TypeScript/blob/b8fbf884d0f01c1a20bb921cc0a65d6c1a517ee8/doc/TypeScript%20Language%20Specification.pdf, versio 1.8.

[6] Installing and setting up Flow for a project. URL https://flow.org/en/docs/install/.

[7] Closure Compiler. URL https://developers.google.com/closure/compiler/.

[8] Annotating JavaScript for the Closure Compiler. https://github.com/google/closure-compiler/wiki/Annotating-JavaScript-for-the-Closure-Compiler.

[9] Anders Hejlsberg. Microsoft Build 2014. TypeScript, maaliskuu 2014. URL https://channel9.msdn.com/Events/Build/2014/3-576.

[10] Shriam Rajagopalan Erik Wittern, Philippe Suter. A Look at the Dynamics of the JavaScript Package Ecosystem. 2016.

[11] DefinitelyTyped – repositorio TypeScript tyypitystiedostoille. URL https://github.com/DefinitelyTyped/DefinitelyTyped.

[12] flow-typed – repositorio Flow tyypitystiedostoille. URL https://github.com/flow-typed/flow-typed.

[13] Flowgen – kääntäjä TypeScriptist-tyypitystiedostoista Flow-tyypitystiedostoiksi, 2016. URL https://github.com/joarwilk/flowgen.

[14] Clutz – kääntäjä Closure-tyypitystiedostoista TypeScript-tyypitystiedostoiksi, 2016. URL https://github.com/angular/clutz.

[15] Tsickle – kääntäjä TypeScriptistä Closureksi, 2014. URL https://github.com/angular/tsickle.

[16] 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.

[17] Earl T. Barr Zheng Gao, Christian Bird. To Type or Not to Type: Quantifying Detectable Bugs in JavaScript. 2017.

[18] MDN: How to use a source map, 2018. URL https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Tools/Debugger/How_to/Use_a_source_map.

[19] Closure Compiler - Source Map documentation, tammikuu 2019. URL https://github.com/google/closure-compiler/wiki/Source-Maps.

[20] 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/.

[21] JavaScript Language Service in Visual Studio, tammikuu 2017. URL https://github.com/Microsoft/TypeScript/wiki/JavaScript-Language-Service-in-Visual-Studio#unsupported-patterns.

[22] 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.

[23] TypeScript Design Goals, syyskuu 2014. URL https://github.com/Microsoft/TypeScript/wiki/TypeScript-Design-Goals.

[24] 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.

[25] Gabriel Isenberg Claude Pache. Optional Chaining for JavaScript, 2018. URL https://github.com/tc39/proposal-optional-chaining.

[26] CSE341: Programming Languages Winter 2013 Unit 6 Summary, 2013. URL https://courses.cs.washington.edu/courses/cse341/13wi/unit6notes.pdf.

[27] Pyre-tyyppitarkastaja Python-kielelle. URL https://github.com/facebook/pyre-check.

[28] PHP-kieleen pohjautuva Hack-kieli. URL https://github.com/facebook/hhvm/tree/master/hphp/hack.

[29] Video: Effective Programs - 10 Years of Clojure - Rich Hickey, 2017. URL https://www.youtube.com/watch?v=2V1FtfBDsLU.

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

[31] Michael Rambeau Raphaël Benitte, Sacha Greif. State of JS 2018 tulokset, 2018. URL https://2018.stateofjs.com/javascript-flavors/overview/.

[32] Sacha Greif. State of JS 2016 tulokset, 2016. URL http://2016.stateofjs.com/2016/flavors/.