

Oona Koponen

# MOBIILISOVELLUSTEN SAAVUTETTAVUUS



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA  
2024

# TIIVISTELMÄ

Koponen, Oona

Mobiilisovellusten saavutettavuus

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2024, 26 s.

Tietojärjestelmätiede, kandidaatintutkielma

Ohjaaja: Lampi, Anna

Viime vuosina monet palvelut ovat siirtyneet digitaaliseen muotoon, ja mobiilisovellukset ovat kasvattaneet suosiotaan. Ei siis ole yllättävää, että saavutettavuuteen on alettu kiinnittää enemmän huomiota. Siitä huolimatta erityisesti mobiilisovellusten saavutettavuudessa on edelleen parannettavaa. Erityisesti vammat ihmiset kohtaavat monia ongelmia käyttäessään mobiilisovelluksia. Mobiilisovellusten saavutettavuuden parantaminen on tärkeää eettisyyden lisäksi myös tehokkuuden kannalta. Saavutettavuus hyödyttää kaikkia. Tämän tutkielman tarkoitus on tutkia yleisimpiä saavutettavuusongelmia mobiilisovelluksissa ja esitellä tapoja tehdä mobiilisovelluksista saavutettavampia. Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena perehtymällä aiheeseen aiempien aihetta käsittelevien töiden kautta. Tutkielmassa saatiin selville, että yleisimpiä saavutettavuusongelmia mobiilisovelluksissa olivat kontrastin heikkous, liian pienet interaktiiviset elementit ja välit elementtien välillä, puuttuvat tekstivastineet ei-tekstuaalisille elementeille, painikkeiden epäinformatiivinen nimeäminen, kuvat teksteistä, informaation huono järjestely sekä elementtien kohdistettavuuden puute. Mobiilisovellusten saavutettavuutta voitaisiin parantaa saavutettavuuden huomioimisella kehityksen alkuvaiheessa, käyttäjälähtöisellä suunnittelulla, saavutettavuustestauksella, saavutettavuuteen liittyvän tietoisuuden lisäämisellä sekä asenteiden muutoksella.

Asiasanat: saavutettavuus, mobiilisovellukset, saavutettavuusohjeet

## ABSTRACT

Koponen, Oona

Accessibility of mobile applications

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2024, 26 pp.

Information Systems, Bachelor's Thesis

Supervisor: Lampi, Anna

In recent years, many services have moved to a digital format and mobile applications have grown in popularity. It is therefore no surprise that the topic of accessibility has started gaining more attention. However, there is still much room for improvement, especially in the field of mobile applications. Disabled people in particular face many challenges with the use of mobile applications. The reasons for increasing accessibility of applications are not only ethical, but also relevant when it comes to efficacy. After all, accessibility benefits everyone. The aim of this thesis is to examine the most common accessibility problems in mobile applications, and to present ways of making mobile applications more accessible. This thesis was made in the form of a literature review, exploring the subject through previous related works. In the thesis, it was found that the most common accessibility problems in mobile applications were the lack of contrast, too small interactive elements, and spaces between elements, missing text alternatives to non-textual elements, non-informative naming of buttons, images of texts, poor organization of information and lack of targeting of elements. The accessibility of mobile applications could be improved by taking accessibility into account in the early stages of development, user-oriented design, accessibility testing, increasing awareness of accessibility and changing attitudes.

Keywords: accessibility, mobile applications, accessibility guidelines

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	5
2	SAAVUTETTAVUUS JA SAAVUTETTAVUUSONGELMAT.....	7
	2.1 Saavutettavuuden määritelmä.....	7
	2.2 Saavutettavuusohjeet .....	8
	2.3 Avustava teknologia.....	10
	2.4 Yleisimmät saavutettavuusongelmat.....	11
3	MOBIILISOVELLUSTEN SAAVUTETTAVUUDEN PARANTAMINEN .	14
	3.1 Mobiilisovellusten suunnittelu .....	14
	3.2 Saavutettavuusohjeiden noudattaminen .....	15
	3.3 Saavutettavuustestaus.....	17
	3.4 Tietoisuus ja asenteet.....	18
4	YHTEENVETO .....	21
	LÄHTEET .....	23

# 1 JOHDANTO

Digitalisoitumisen myötä yhä useammat palvelut siirtyvät digitaaliseen muotoon. Viime vuosina erityisesti mobiilisovellukset, joilla tarkoitetaan erityisesti mobiililaitteille, kuten älypuhelimille ja tableteille asennetuille mobiilikäyttöjärjestelmille tarkoitettuja IT-ohjelmistoja (Hoehle & Venkatesh, 2015), ovat kasvattaneet suosiotaan, ja niistä on tullut osa ihmisten arkea. On siis tärkeää, että jokainen pystyy käyttämään mobiilisovelluksia, ja saavuttamaan tavoitteensa tehokkaasti niitä käyttämällä.

Valitettavasti näin ei kuitenkaan aina ole. Monet ihmisryhmät on jätetty huomioimatta mobiilisovellusten suunnittelussa. Erityisesti vammaiset ihmiset, joista yleisimmin sokeat, näkövammaiset sekä ihmiset joilla on oppimisvaikeuksia, kuulovamma tai jokin fyysinen vamma, kohtaavat useita ongelmia mobiilisovelluksia käyttäessään (Brophy & Craven, 2007). Vammaiset ihmiset ovat merkittävän suuri ryhmä ihmisiä. World Health Organizationin mukaan jo pelkästään näkövammaisia ihmisiä on ollut vuonna 2020 maailmanlaajuisesti jopa 285 miljoonaa (Al-Razgan ym., 2021). Siksi on tärkeää huomioida, että myös he voivat käyttää mobiilisovelluksia. Tästä voidaan huolehtia saavutettavuudella.

Saavutettavuudelle ei ole yhtä selkeää määritelmää. Osassa lähteistä saavutettavuus on määritelty käytettävyyden kautta (Billi ym., 2010). Osa määritelmistä keskittyy erityisesti eri vammojen tai iän tuomiin ongelmiin (Kirkpatrick ym., 2018; Silva ym., 2018). Vaikka määritelmässä on erilaisia lähestymistapoja, ja niissä on korostettu eri ihmisryhmiä, on saavutettavuuden määritelmässä myös selvä yhtenäinen päämäärä. Saavutettavuudella tarkoitetaan yksinkertaisimmillaan, että mahdollisimman moni ihminen pystyy käyttämään tuotetta tai palvelua. Erilaisista rajoitteista kärsivien ihmisten lisäksi saavutettavuus voi hyödyttää myös muita käyttäjiä tekemällä sovelluksista käytettävämpiä.

Saavutettavuusongelmia on alettu viime vuosina huomioidaan paremmin. 1.4.2019 astui voimaan laki digitaalisten palvelujen tarjoamisesta, jolla pantiin täytäntöön julkisen sektorin elinten verkkosivustojen ja mobiilisovellusten saavutettavuudesta annettu Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2016/2102 eli saavutettavuusdirektiivi (FINLEX® - Säädökset alkuperäisinä, 2019). Myös mobiilisovellukset ovat olleet osana digipalvelulakia ja

saavutettavuusvaatimuksia 23.6.2023 lähtien (Suomalainen, 2021). Taustalla on myös YK:n Yleissopimus vammaisten henkilöiden oikeuksista, jossa on mainittu yhtenä osana tieto- ja viestintäteknologioiden ja -järjestelmien saavutettavuus (FINLEX® - Sopimustekstit, 2016).

Tässä kandidaatintutkielmassa käsitellään saavutettavuusongelmia sekä keinoja saavutettavuuden parantamiseen mobiilisovellusten kontekstissa. Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- 1) *Millaisia ongelmia mobiilisovelluksissa on saavutettavuuden kannalta?*
- 2) *Miten mobiilisovelluksia voidaan kehittää saavutettavammiksi?*

Tutkielma on toteutettu Salmisen (2011) jaottelun mukaan kuvailevana kirjallisuuskatsauksena. Tarkemmin tutkielman toteutustapa on narratiivinen yleiskatsaus (Salminen, 2011). Lähteitä on etsitty Google Scholarista hakutermeillä "accessibility mobile applications" ja "accessibility mobile apps". Näiden lähteiden luotettavuus on tarkastettu Julkaisuforumin luokituksen perusteella. Lisäksi lähteitä on etsitty Scopuksen kautta tietojärjestelmätieteen tärkeimmiltä julkaisijoilta hakusanalla "accessibility", mutta tällä rajauksella ei löytynyt kovinkaan paljon lähteitä. Myöskään suomenkieliset hakusanat eivät tuottaneet tulosta. Myös edellisillä tavoilla etsittyjen lähteiden lähdeluetteloita on hyödynnetty lähteiden etsimisessä. Tutkielmassa on hyödynnetty mobiilisovellusten saavutettavuutta käsittelevien lähteiden lisäksi myös verkkosivujen saavutettavuutta käsitteleviä lähteitä, koska mobiilisovelluksiin keskittyviä tutkimuksia löytyi vain rajallinen määrä.

Tutkielma koostuu kahdesta sisältöluvusta. Toinen luku taustoittaa tutkimuksen kannalta olennaisia saavutettavuusohjeita sekä vastaa ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Kolmannessa luvussa vastataan toiseen tutkimuskysymykseen suunnittelun, saavutettavuusohjeiden noudattamisen, saavutettavuustestauksen sekä tietoisuuden ja asenteiden näkökulmasta.

Tutkielmassa saatiin tulokseksi, että saavutettavuuden parantamiseen mobiilisovelluksissa on olemassa hyviä työkaluja. Näitä ei kuitenkaan hyödynnetä kaikkien sidosryhmien saavutettavuuteen liittyvän tiedon puutteesta ja asenteista johtuen. Siksi merkittävin tekijä saavutettavuuden kannalta olisi lisätä tietoisuutta saavutettavuudesta ja muuttaa ihmisten asenteita saavutettavuutta kohtaan.

## 2 SAAVUTETTAVUUS JA SAAVUTETTAVUUSONGELMAT

Tässä luvussa tarkastellaan tutkielman kannalta keskeisimpiä käsitteitä sekä saavutettavuusohjeita, joihin tullaan viittaamaan myöhemmin tutkielmassa useita kertoja. Lisäksi luvussa esitellään avustavaa teknologiaa sekä yleisimpiä saavutettavuusongelmia.

### 2.1 Saavutettavuuden määritelmä

Useissa tutkimuksissa saavutettavuuden määritelmänä käytetään ISO 9241-11 -standardin määritelmää, jonka mukaan saavutettava teknologia on käytettävää mahdollisimman monelle ihmiselle riippumatta hänen ominaisuuksistaan tai kyvyistään (L. P. Carvalho ym., 2016; Mateus ym., 2020; Mäkipää ym., 2022; Zaina ym., 2022). Osa lähteistä määrittelee saavutettavuuden käytettävyyden kautta (Billi ym., 2010). Usein määritelmät keskittyvät erityisesti eri vammojen aiheuttamiin ongelmiin (Kirkpatrick ym., 2018; Silva ym., 2018). Myös iän tuomat haasteet on huomioitu joissain saavutettavuuden määritelmässä (Kirkpatrick ym., 2018). Al-Razganin ym. (2021) mukaan saavutettavuus tarkoittaa sitä, että käyttäjän ominaisuuksista riippumatta tuotteen käyttökokemus on kaikille sama. Saavutettavuus tarkoittaa yksinkertaisimmillaan, että tuote tai palvelu on käytettävä kaikille ihmisille.

Mobiilisovelluksen käytettävyys puolestaan tarkoittaa, että käyttäjä pystyy saavuttamaan tavoitteensa mobiilisovelluksen avulla tehokkaasti (Hoehle & Venkatesh, 2015). Myös Ferreira ym. (2020) tukee väitettä. Hän kuitenkin korostaa tehokkuuden mittaamisessa aikaa ja vaivattomuutta sekä lisää määritelmään käyttäjätyytyväisyyden (Ferreira ym., 2020).

Mäkipää ym. (2022) määritteli kolme ominaisuutta, jotka yhdessä luovat tavoitteen saavutettavuudelle. Nämä ominaisuudet ovat koettu autonomia, koettu järjestelmän laatu ja koettu tiedon laatu (Mäkipää ym., 2022).

Saavutettavuusongelmista kärsivät eniten sokeat ihmiset (Yan & Ramachandran, 2019). Myös Carvalhon ym. (2018) mukaan sokeilla käyttäjillä on selvästi enemmän ongelmia mobiilisovellusten käyttämisessä kuin normaalin näkökyvyn omaavilla ihmisillä. Tutkimuksessa 91,67 prosenttia normaalisti näkevästä pystyi suorittamaan annetut tehtävät mobiilisovelluksella, kun taas sokeista vain 33,3 prosenttia suoriutui kyseisistä tehtävistä (M. C. N. Carvalho ym., 2018). Monet ongelmista koskevat kaikkia käyttäjiä, mutta niillä on erityisen suuri vaikutus sokeiden ihmisten mahdollisuuksiin suoriutua tehtävistä (M. C. N. Carvalho ym., 2018).

Saavutettavuusongelmia löydetään myös sovelluksista, joiden tarkoitus on helpottaa vammaisten ihmisten elämää. (L. P. Carvalho ym., 2016; de Oliveira ym., 2016). Esimerkiksi esineiden internet -sovelluksista, löytyy useita ongelmia, jotka vaikuttavat erityisesti näkövammaisten ihmisten mahdollisuuksiin käyttää sovellusta (de Oliveira ym., 2016).

Vaikka saavutettavuusominaisuudet on suunniteltu enimmäkseen vammaisille ihmisille, monet ominaisuudet ovat hyödyllisiä melkein kaikille käyttäjille (Theofanos & Redish, 2003; Yan & Ramachandran, 2019). Esimerkiksi riittävän tilan puute elementtien välillä ja pieni elementtikoko vaikuttavat elementtien käytettävyyteen yleisesti (Yan & Ramachandran, 2019).

## 2.2 Saavutettavuusohjeet

Saavutettavien mobiilisovellusten luomiseksi on kehitetty ohjeita. Näitä ohjeita on hyödynnetty monissa myöhemmin esitellyissä tutkimuksissa apuna sovellusten saavutettavuuden arvioinnissa. Tässä luvussa on esitelty yleisimmin tutkimuksissa esiin nostetut ohjeet.

Useimmin tutkimuksissa hyödynnetyt saavutettavuusohjeet ovat World Wide Web Consortiumin (W3C) kehittämät Verkkosisällön saavutettavuusohjeet (eng. *Web Content Accessibility Guidelines*). Myös EU:n saavutettavuusdirektiivi perustuu näihin saavutettavuusohjeisiin (Mäkipää ym., 2022). Vuosien mittaan saavutettavuusohjeista on ilmestynyt uusia versioita. Tässä alaluvussa käsitellään WCAG 2.0:n ja WCAG 2.1:n sisältöjä. Käsitteiden suomentamisessa on hyödynnetty Verkkosisällön saavutettavuusohjeiden suomenkielisiä versioita, joista WCAG 2.1 on käänös vuonna 2018 julkaistusta, nyt jo vanhentuneesta versiosta (suom. Nykänen & Tervakari, 2011; Övermark & Haanperä, 2019).

Näiden saavutettavuusohjeiden lisäksi on kehitetty myös muita saavutettavuusohjeita. Esimerkiksi British Broadcasting Corporation (BBC) on kehittänyt saavutettavuusohjeet mobiilisovelluksille (BBC, 2024). Myös The W3C Web Accessibility Initiative (WAI) on kehittänyt ohjeet WCAG 2.0:n ohjeiden soveltamisesta mobiililaitteille (Patch ym., 2015). Edellä mainitut saavutettavuusohjeet muistuttavat sisällöltään hyvin paljon toisiaan, ja BBC:n sivuilla jopa viitataan W3C:n ohjeisiin, mutta niiden jaottelut eroavat toisistaan. Monia verkkosivuihin kohdistuvia saavutettavuusohjeita voi soveltaa mobiilisovelluksiin, mutta mobiilisovellusten kehittämisessä tulee huomioida mobiililaitteiden erot kuten pieni



näyttö ja vaihtelevat käyttöolosuhteet verrattuna verkkosivujen käyttöön tietokoneilla (Patch ym., 2015).

WCAG 2.0:n periaatteet sisältävät yhteensä 12 ohjetta, joille on annettu onnistumiskriteerit (Caldwell ym., 2011). ”Ohjeiden noudattamiselle on määritelty kolme tasoa: A (matalin), AA ja AAA (korkein)” (Caldwell ym., 2011). WCAG 2.1 noudattaa samaa jaottelua, mutta siihen on lisätty yksi uusi ohje ja useita uusia onnistumiskriteerejä (Kirkpatrick ym., 2018). WCAG 2.1:n tarkoitus on täydentää WCAG 2.0:n ohjeistusta, mutta ei korvata sitä (Kirkpatrick ym., 2018). WCAG 2.0:ssa saavutettavuusohjeet on jaettu neljään periaatteeseen: havaittavuus (eng. *perceivable*), hallittavuus (eng. *operable*), ymmärrettävyys (eng. *understandable*) ja lujatekoisuus (eng. *robust*) (Caldwell ym., 2011).

Havaittavuudella tarkoitetaan, että ”informaatio ja käyttöliittymäkomponentit pitää esittää tavoilla, jotka käyttäjä voi havaita” (Caldwell ym., 2011). Tähän sisältyy muun muassa tekstivastineet ei-tekstuaaliselle sisällölle, vastineet aikasidonmaiselle medialle, mukautettavuus eri esitystapoihin informaatiota tai rakennetta menettämättä sekä tekstin ja audion erottuvuus taustasta (Caldwell ym., 2011).

Mobiilikontekstissa havaittavuuden kannalta olennaista on huomioida, että mobiililaitteissa on usein suhteellisen pieni näyttö (Patch ym., 2015). Kaiken sisällön tulisi olla zoomattavissa 200 prosenttiin ilman avustavaa teknologiaa (Patch ym., 2015). Artikkelissa korostetaan myös kontrastin tärkeyttä, sillä erilaiset olosuhteet kuten auringonpaiste voivat vaikuttaa havaittavuuteen.

Hallittavuudella tarkoitetaan, että ”käyttöliittymäkomponenttien ja navigoinnin pitää olla hallittavia” (Caldwell ym., 2011). Tähän voidaan vaikuttaa esimerkiksi mahdollistamalla kaikkien toimintojen käyttö näppäimistöä, antamalla käyttäjälle riittävästi aikaa katsoa ja käyttää sisältöä ja tarvittaessa muuttaa toiminnallisuuksien kestoa tai pysäyttää liikkuvat ominaisuudet, välttämällä sairaskohtauksia aiheuttavia ominaisuuksia kuten liian usein toistuvia välähdyksiä ja helpottamalla navigointia esimerkiksi otsikoiden ja järjestelyn avulla (Caldwell ym., 2011). WCAG 2.1 lisää hallittavuuteen vielä muiden kuin näppäimistön syötetapojen helppokäyttöisyyden (Kirkpatrick ym., 2018).

Myös kosketusnäytöllä varustettujen mobiililaitteiden tulisi olla käytettävissä erillisen näppäimistön avulla (Patch ym., 2015). Kosketusnäyttö tuo mukanaan myös muita vaatimuksia kuten riittävän suuret painikkeet ja välit painikkeiden välillä, sekä painikkeiden asettelun siten, että niitä on helppo käyttää myös yhdellä kädellä (Patch ym., 2015). Tämän lisäksi useissa sovelluksissa käytetään useanlaisia kosketustyyppisiä kuten painalluksia ja liu'utuksia, jotka voivat olla vaikeakäyttöisiä (Patch ym., 2015).

Ymmärrettävyydellä tarkoitetaan, että ”informaation ja käyttöliittymän toiminnan pitää olla ymmärrettävää” (Caldwell ym., 2011). Tähän sisältyy muun muassa tekstisisällön tekeminen mahdollisimman luettavaksi ja ymmärrettäväksi, verkkosivun tekeminen mahdollisimman ennakoitavaksi sekä käyttäjän avustaminen virheiden ehkäisemisessä ja korjaamisessa esimerkiksi ilmoittamalla virheistä (Caldwell ym., 2011).

Mobiililaitteissa ymmärrettävyyden kannalta tulee huomioida esimerkiksi muuttuva näytön suunta ja tärkeiden elementtien asettelu niin, että ne näkyvät myös pienemmällä näytöllä ilman skrollausta (Patch ym., 2015). Toiminnalliset elementit tulee toteuttaa niin, että käyttäjä ymmärtää niiden olevan toiminnallisia, ja samanlaiset elementit tulisi ryhmitellä yhteen (Patch ym., 2015). Lisäksi kosketustoimintojen käyttöön tulisi olla saatavilla ohjeet (Patch ym., 2015).

Lujatekoisuudella tarkoitetaan, että ”sisällön pitää olla riittävän lujatekoisen, jotta se voidaan luotettavasti tulkita laajalla joukolla asiakasohjelmia, mukaan lukien avustavat teknologiat” (Caldwell ym., 2011). Tämä tarkoittaa esimerkiksi, että sivusto on toteutettu merkkäuskieltä käyttämällä, käyttöliittymäkomponenttien nimet ja roolit on ohjelmallisesti selvitettävissä ja verkkosivu on käytettävissä avustavalla teknologialla (Caldwell ym., 2011).

Mobiilikontekstissa käyttäjät voivat käyttää eri tapoja datan syöttämiseen, jolloin käytön helpottamiseksi sovelluksessa tulisi tarjota mahdollisimman helpokäyttöisiä datansyöttötapoja (Patch ym., 2015). Lisäksi käyttäjälle tulisi mahdollistaa hänen henkilökohtaiset asetuksensa kuten tekstin suurentaminen (Patch ym., 2015).

## 2.3 Avustava teknologia

Joillekin ihmisille graafisen käyttöliittymän käyttäminen on mahdotonta ilman avustavaa teknologiaa. Siksi useimmissa mobiililaitteissa on sisäänrakennettuja saavutettavuusominaisuuksia, jotka voivat auttaa käyttäjää esimerkiksi lukemisessa tai kirjoittamisessa.

Yksi yleisimmin käytetyistä teknologioista on näytönlukija, josta Android-laitteilla on käytössä TalkBack ja iOS-laitteilla VoiceOver (Yan & Ramachandran, 2019). Näytönlukijasta on hyötyä erityisesti sokeille ja näkövammaisille ihmisille (Yan & Ramachandran, 2019). Leporinin ym. (2012) tutkimuksen mukaan VoiceOver tekee Applen laitteista käytännössä saavutettavia sokeille ihmisille. Pichilianin ja Hiratan (2015) tutkimuksessa puolestaan Android accessibility API pystyi tunnistamaan 97 prosenttia graafisen käyttöliittymän elementeistä oikein (Pichiliani & Hirata, 2015). Kocieliński ja Brzostek-Pawłowska (2013) eivät kuitenkaan suhtaudu edellä mainittuihin avustaviin teknologioihin yhtä optimistisesti. Heidän mielestään TalkBack ja VoiceOver parantavat saavutettavuutta, mutta eivät poista kaikkia ongelmakohtia. Kocieliński ja Brzostek-Pawłowska (2013) kuvailevat nykyisiä älypuhelimien tekstinsyöttöön liittyviä saavutettavuusmekanismeja riittämättömiksi.

Toinen sisäänrakennettu saavutettavuusominaisuus on saneluominaisuus, joka muuttaa käyttäjän puheen tekstiksi. Monet sokeat ihmiset kommunikoivat mobiililaitteita käyttäessään puheen avulla, mikä vähentää tarvittavien eleiden määrää (Al-Razgan ym., 2021). Saneluominaisuuden käyttöön voi kuitenkin liittyä yksityisyysongelmia, jos ominaisuutta käytetään julkisilla paikoilla (Leporini ym., 2012).

Mobiililaitteissa on mahdollista vaihtaa tekstin kokoa asetuksista (Yan & Ramachandran, 2019), mikä on myös hyödyllinen ominaisuus erityisesti heikkonäköisille ihmisille. Mobiililaitteisiin on mahdollista yhdistää myös ulkoisia laitteita. Jotkut sokeat ihmiset voivat esimerkiksi käyttää ulkoista näppäimistöä (Yan & Ramachandran, 2019).

Al-Razganin ym. (2021) tutkimuksessa esiteltiin pistekirjoitusta vaihtoehtona QWERTY-näppäimistölle. Pistekirjoitusta voi hyödyntää esimerkiksi fyysisen pistekirjoitusnäppäimistön, pistekirjoittimen (eng. *braille notetaker*) tai kuusi-painikkeisen virtuaalisen pistekirjoitusnäppäimistön avulla (Kocieliński & Brzostek-Pawłowska, 2013). Tutkimuksessa pistekirjoitusnäppäimistöä saatiin positiivista palautetta (Al-Razgan ym., 2021). Myös Kocielińskin & Brzostek-Pawłowskan (2013) tutkimuksessa mainittiin pistekirjoituksen hyödyt verrattuna QWERTY-näppäimistöön.

Avustava teknologia ei kuitenkaan yksin ratkaise saavutettavuusongelmia, sillä jos mobiilisovelluksia ei ole suunniteltu oikealla tavalla, niitä ei välttämättä pysty käyttämään avustavalla teknologialla. Yanin ja Ramachandranin (2019) mukaan avustavan teknologian ollessa näin hyvällä tasolla, mobiilisovellusten saavutettavuus on sovelluskehittäjien vastuulla. Tutkimuksissa mobiilisovelluksista löydettiin paljon saavutettavuusongelmia, ja hyvin suuri osa niistä liittyi juuri avustavan teknologian käyttöön.

Yksi merkittävimmistä tutkimuksissa ilmenneistä ongelmista oli elementtien kohdistettavuuden puuttuminen. Kohdistettavuuden puute tekee mahdottomaksi elementin valinnan näppäimistön avulla, ja tekee elementistä pahimmillaan jopa täysin näkymättömän avustavalle teknologialle (Yan & Ramachandran, 2019).

Toinen yleinen ongelma oli ei-tekstuaalisten elementtien tekstivaihtoehtojen puuttuminen tai elementtien huono nimeäminen, mikä estää näytönlukijaa välittämässä tarvittavaa informaatiota käyttäjälle (Balaji & Kuppusamy, 2016; M. C. N. Carvalho ym., 2018; de Oliveira ym., 2016; Leporini ym., 2012; Yan & Ramachandran, 2019). Monien sovellusten käyttö on myös hitaampaa näytönlukijan avulla johtuen esimerkiksi epäloogisesta navigointijärjestyksestä, huonoista otsikoista tai liiallisesta tekstin määrästä (Balaji & Kuppusamy, 2016; L. P. Carvalho ym., 2016; M. C. N. Carvalho ym., 2018; Leporini ym., 2012).

Myös erilaiset käyttöliittymäsuunnittelumallit voivat aiheuttaa ongelmia näytönlukijalle. Zainan ym. (2022) tutkimuksesta käy ilmi, että erityisesti taulukot ovat usein vaikeasti luettavissa näytönlukijan avulla johtuen esimerkiksi puuttuvista taulukonreunoista ja väärästä miinussymbolin käytöstä (Zaina ym., 2022).

## 2.4 Yleisimmät saavutettavuusongelmat

Tutkimuksissa useissa mobiilisovelluksissa ilmenee hyvin samankaltaisia saavutettavuusongelmia. Tässä kappaleessa esitellään niistä yleisimmin esiin nousseet.

Kontrastin heikkous on todella yleinen ongelma useissa eri tutkimuksissa (Balaji & Kuppusamy, 2016; L. P. Carvalho ym., 2016; Yan & Ramachandran, 2019). Heikkonäköisillä ihmisillä voi olla haasteita lukea, havaita ja valita tekstejä ja painikkeita, joissa on liian pieni kontrasti (Balaji & Kuppusamy, 2016; L. P. Carvalho ym., 2016; Yan & Ramachandran, 2019). Alhainen kontrasti voi vaikeuttaa sovelluksen käyttämistä myös näkeville ihmisille erityisesti kirkkaassa aurin-  
gonvalossa (L. P. Carvalho ym., 2016). Myös liian pieni fonttikoko heikentää tekstin luettavuutta (Yan & Ramachandran, 2019).

Yksi ongelma on liian pienet interaktiiviset elementit sekä liian pienet välit elementtien välillä, mikä heikentää kosketustarkkuutta (Balaji & Kuppusamy, 2016; Yan & Ramachandran, 2019). Liian pienet elementit ja välit vaikuttavat erityisesti käyttäjiin, joilla on fyysinen vamma, mutta suuremmat elementit ja välit parantavat myös muiden ihmisten kosketustarkkuutta (Yan & Ramachandran, 2019).

Yksi usein toistuva ongelma on puuttuvat tekstivastineet ei-tekstuaalisille elementeille (Balaji & Kuppusamy, 2016; L. P. Carvalho ym., 2016; M. C. N. Carvalho ym., 2018). Tutkimuksista käy ilmi, että sovelluksissa symboleille ja muille ei-tekstuaalisille elementeille ei ole vaihtoehtoista tekstiä, joten näytönlukija ei pysty lukemaan elementtiä oikein tai pahimmissa tapauksissa edes tunnistamaan kyseistä elementtiä (L. P. Carvalho ym., 2016; de Oliveira ym., 2016). Joidenkin elementtien suhde toisiinsa on esitetty vain visuaalisesti esimerkiksi taustavärin avulla, joten avustava teknologia ei pysty tunnistamaan elementtien yhteyttä (de Oliveira ym., 2016).

Useissa tutkimuksissa juuri painikkeisiin liittyvät tekstit puuttuvat. Yanin ja Ramachandranin (2019) mukaan käyttäjän on vaikea ymmärtää painikkeen tarkoitus, jos siihen liittyvä teksti puuttuu. Myös muissa tutkimuksissa yleisenä ongelmana on, että painikkeiden toiminnallisuus on ilmaistu pelkästään kuvan avulla, mikä aiheuttaa ongelmia näytönlukijalle, joka lukee kaikki painikkeet samalla tavalla (L. P. Carvalho ym., 2016; M. C. N. Carvalho ym., 2018). Carvalhon ym. (2018) tutkimuksessa joissain painikkeissa on teksti alapuolella, mutta näytönlukijan käyttäjille on epäselvää, mikä teksti liittyy mihinkin painikkeeseen.

Vaikka painikkeet olisi nimetty, niiden nimeäminen ei ole kaikissa tapauksissa riittävän informatiivista. Carvalhon ym. (2016) tutkimuksessa elementtien nimet eivät tarjoa riittävää informaatiota niiden tarkoituksesta, ja osa painikkeista näyttäytyy linkkeinä näytönlukijalle. Myös Balajin ja Kuppusamyn (2016) tutkimuksessa painikkeet on nimetty epäinformatiivisesti esimerkiksi nimillä "button 1" ja "button 2". Riittävän kuvauksen puuttuminen aiheuttaa ongelmia näytönlukijan käyttäjille, jotka eivät saa tarvittavaa tietoa elementin tarkoituksesta (Yan & Ramachandran, 2019).

Carvalhon ym. (2016) tutkimuksessa sovelluksista löydetään myös kuvia teksteistä. Tämä estää elementin tunnistamisen tekstiksi avustavalla teknologialla, jolloin sen muuttaminen henkilön tarpeiden mukaan ei ole mahdollista, mikä on ongelmallista esimerkiksi heikkonäköisille ihmisille (L. P. Carvalho ym., 2016).

Useissa sovelluksissa navigointi on haastavaa, koska informaatio on huonosti järjestetty, eikä auta käyttäjiä löytämään sitä, mitä he etsivät (M. C. N. Carvalho ym., 2018). Esimerkiksi otsikoiden puute tai huonot otsikot hidastavat oikean sivun tai tiedon etsimistä erityisesti sokeille ihmisille, jotka käyttävät näytönlukijaa (L. P. Carvalho ym., 2016). Useissa tapauksissa näytönlukija lukee sisällön epätarkoituksenmukaisessa järjestyksessä, mikä hidastaa entisestään sokean käyttäjän navigointia sovelluksessa (Balaji & Kuppusamy, 2016). Myös liika tieto samalla sivulla vaikeuttaa etsityn asian löytämistä kaikille käyttäjille (M. C. N. Carvalho ym., 2018). Sovellukset eivät myöskään aina anna tietoa sijainnista sovelluksen sisällä (L. P. Carvalho ym., 2016). Lisää haastetta aiheuttaa se, että sovellukset eivät anna mitään palautetta siitä, että suoritettu tapahtuma on onnistunut (M. C. N. Carvalho ym., 2018).

Yksi ongelma on, että käyttäjä saa käsityksen, että jollain elementillä on toiminnallisuus, vaikka sitä ei ole, koska esimerkiksi lomake-elementeissä käyttäjät pystyvät tunnistamaan vain tekstielementit (M. C. N. Carvalho ym., 2018).

Useissa tutkimuksissa havaittiin myös, että kaikki sovelluksissa käytetyt elementit eivät ole kohdistettavia. Kohdistettavuuden puute on erityisen vakava virhe näytönlukijaa apunaan käyttäville ihmisille (L. P. Carvalho ym., 2016; Yan & Ramachandran, 2019). Kohdistettavuuden puuttuessa elementti ei ole valittavissa tai havaittavissa näytönlukijan avulla (Yan & Ramachandran, 2019). De Oliveiran (2016) IoT-sovelluksia käsittelevässä tutkimuksessa muun muassa valon värin vaihtaminen tapahtuu liu'uttimella, jota ei voi käyttää avustavalla teknologialla. Carvalhon ym. (2016) tutkimuksessa löydetään myös käyttöliittymäkomponentteja, joista pääsee pois vain visuaalisen käyttöliittymän avulla, mikä tarkoittaa, että näytönlukijan käyttäjät jäävät jumiin komponenttiin (L. P. Carvalho ym., 2016).

### 3 MOBIILISOVELLUSTEN SAAVUTETTAVUUDEN PARANTAMINEN

Tässä luvussa tarkastellaan keinoja mobiilisovellusten saavutettavuuden parantamiseksi. Lisäksi tarkastellaan syitä saavutettavuuden huomiotta jättämiselle sovelluksia kehittäessä, sillä ongelmien korjaamiseksi on hyvä ymmärtää myös syyt niiden taustalla.

#### 3.1 Mobiilisovellusten suunnittelu

Tutkijat vaikuttavat olevan melko yksimielisiä siitä, että saavutettavuus tulisi huomioida mahdollisimman aikaisessa vaiheessa mobiilisovellusten suunnittelussa (Billi ym., 2010; Di Gregorio ym., 2022; Yan & Ramachandran, 2019). Kustannuksia voitaisiin vähentää merkittävästi, jos saavutettavuus huomioidaan suunnitteluvaiheessa eikä kehitysvaiheen lopussa (Yan & Ramachandran, 2019). Billi ym. (2010) väittää tutkimuksessaan saavutettavuuden lisäämisen jälkeenpäin jopa kymmenkertaistavan kustannukset.

Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksessa suositellaan käyttäjälähtöistä suunnittelua, ja erityisesti vammaisten käyttäjien ottamista kehitystyöhön mukaan. Mäkipää ym. (2022) toteaa tutkimuksessaan, että vammaisten käyttäjien, heidän huoltajiensa ja ei-vammaisten käyttäjien tulisi olla mukana suunnittelu-, testaus- ja arviointiprosesseissa, jotta heidän todelliset tarpeensa saataisiin huomioitua. Myös Kane ym. (2011) suosittelee käyttäjien ottamista mukaan kehitystyöhön. Monet sokeita käyttäjiä koskevat tutkimukset tehdään ihmisille, joilla on silmät sidottuina, vaikka oikeasti sokeat ihmiset osaisivat antaa parempaa palautetta sovellusten kehittämiseen (Al-Razgan ym., 2021). Mobiilisovellusten kehittäjät ovat usein näkeviä, joten heidän voi olla vaikea ymmärtää, kuinka sokeat ihmiset käyttävät kosketusnäyttöjä (Kane ym., 2011). Jotta käyttäjien tarpeet saataisiin oikeasti huomioitua, on tärkeää kuunnella käyttäjiä ja ymmärtää heidän tarpeensa (Theofanos & Redish, 2003).

Saavutettavia kosketusnäyttökäyttöliittymiä suunnitellessa tulee ymmärtää, kuinka sokeat ihmiset käyttävät kosketusnäyttöä (Kane ym., 2011). Kanen ym. (2011) tutkimuksen mukaan sokeilla ihmisillä on käyttöliittymien suhteen erilaisia mieltymyksiä verrattuna näkeviin ihmisiin. Al-Razganin ym. (2021) mukaan sokeat ihmiset suosivat eleissä pyöreitä muotoja, koska suorien viivojen tekeminen oikeassa kulmassa on haastavaa. Theofanos ja Redish (2003) sen sijaan tuovat esille, että sokeilla ihmisillä on kuitenkin samanlaisiakin mieltymyksiä. Heidän mukaansa sokeat ihmiset ovat aivan yhtä kärsimättömiä kuin näkevätkin käyttäjät, eivätkä siis tahdo kuunnella jokaista näytönlukijan lukemaa sanaa ja esimerkiksi asettavat näytönlukijan puhumaan todella nopeasti tai lukevat pelkät otsikot.

Tutkimuksessa esiteltiin myös konkreettisia ohjeita saavutettavien käyttöliittymien suunnitteluun. Kane ym. (2011) suosittelee välttämään eleitä, joissa käyttäjän tarvitsee piirtää symboleja kuten kirjaimia tai numeroita, koska tällaiset symbolit eivät välttämättä ole tuttuja sokeille ihmisille. Lisäksi Kane ym. (2011) suosittelee tärkeiden toimintojen asettamista reunoille, koska sokeiden ihmisten on vaikea paikantaa kohteita näytöltä, ja he voivat käyttää reunoja apuna paikantamiseen. Myös Kocieliński & Brzostek-Pawłowska (2013) mainitsevat tutkimuksessaan sokeiden ihmisten suosivan eleitä, jotka alkavat reunoilta tai niiden läheltä. Kane ym. (2011) myös suosittelee välttämään liian tarkan kosketuksen vaatimista käyttäjiltä. Myöskään aikaan perustuvien eleiden kuten skrollausnopeuden käyttö ei ole suositeltavaa (Kane ym., 2011).

Sen sijaan perinteisen tila-asettelun kuten QWERTY-näppäimistön käyttö on suositeltavaa, koska se on ennestään tuttu monille sokeille ihmisille, ja vähentää siten opetteluun kuluvaan aikaa (Kane ym., 2011). Toisaalta taas Kocieliński & Brzostek-Pawłowska (2013) kertovat virtuaalisen QWERTY-näppäimistön käytön olevan haastavaa sokeille ihmisille.

Kimin ym. (2016) tutkimuksessa suositellaan käyttämään mahdollisimman yksinkertaista ja johdonmukaista käyttöliittymää, koska tutkimuksessa huomattiin, että sokeat käyttäjät yrittävät opetella käyttöliittymän asettelun ennen käyttöä. Tutkimuksessa suositellaan myös konfiguroitavien asetusten lisäämistä (Kim ym., 2016).

Di Gregorion ym. (2022) mukaan ohjelmistotuotannon ja ihmisen ja tietokoneen vuorovaikutuksen (eng. *Human-computer interaction*) pitäisi tehdä enemmän yhteistyötä, jotta voitaisiin kehittää saavutettavia mobiilisovelluksia.

## 3.2 Saavutettavuusohjeiden noudattaminen

Saavutettavuusohjeiden hyödyntämisellä on tärkeä osa saavutettavuuden parantamisessa, ja monet tutkimukset suosittelevatkin niiden noudattamista (Mäkipää ym., 2022; Yi, 2015). Tutkimuksissa kävi kuitenkin ilmi, että saavutettavuusohjeiden mukaiset saavutettavuusvaatimukset toteutuivat hyvin harvoissa mobiilisovelluksissa.

Yanin ja Ramachandranin (2019) tutkimuksessa testattiin 479 mobiilisovellusta, ja niistä vain kahdeksasta ei löytynyt yhtään saavutettavuusongelmaa. Di Gregorion ym. (2022) mukaan 94 prosenttia saavutettavuusohjeista on mahdollista hyödyntää Android-mobiilisovelluksissa. Saavutettavuusohjeita ei kuitenkaan silti hyödynnetä sovelluksissa, ja Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksen mukaan mobiilisovelluksissa hyödynnettiin keskimäärin 41 prosenttia mahdollisista käytettävistä ohjeista.

Osa saavutettavuusongelmista on toisia yleisempiä. Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksessa saavutettavuus toteutuu yleisimmin suunnittelun osalta, ja harvimmoin audion ja videon osalta. Yanin ja Ramachandranin (2019) tutkimuksessa taas yleisimpiä rikkomuksia ovat elementin kohdistettavuuden puute, elementin kuvauksen puute, tekstin alhainen värikontrasti sekä elementtien ja välien liian pieni koko.

Yanin ja Ramachandranin (2019) tutkimuksessa käy ilmi, että sovellusten latausmäärillä ja arvosteluilla ei vaikuttaisi olevan vaikutusta saavutettavuusrikkomusten määrään. Toisaalta tutkimuksessa tutkittiinkin suosittuja ja suhteellisen hyviksi arvioituja sovelluksia.

Mobiilisovelluksia suunnitellessa kehittäjät eivät usein kiinnitä huomiota saavutettavuuteen (Di Gregorio ym., 2022). Di Gregorion ym. (2022) mukaan tämä voi johtua esimerkiksi kehittäjien puutteellisesta tiedosta saavutettavien sovellusten kehittämiseksi. Myös Zaina ym. (2022) mainitsee kehittäjien ja suunnittelijoiden teknisten taitojen puutteen sekä saavutettavuusohjeiden noudattamisen haasteet syynä ohjelmistojen saavutettavuuden puutteellisuudelle. Toisaalta Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksesta käy ilmi, että suurimmalla osalla kehittäjistä on edes jonkin verran tietämystä saavutettavuudesta, mutta he eivät siitä huolimatta hyödynnä saavutettavuusohjeita sovellusten kehittämisessä. Tutkimuksesta käykin ilmi, että suurin osa kehittäjistä ei pidä suurimman osan saavutettavuusosa-alueista sisällyttämistä sovelluksiin kovinkaan haastavina (Di Gregorio ym., 2022).

Kuitenkin myös saavutettavuusohjeiden epäkonkreettisuutta ja epäselvyyttä on kritisoitu. Esimerkiksi Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksessa yhdeksi haasteeksi saavutettavuuden parantamisessa mainittiin saavutettavuusohjeiden epämääräisyys. Lazarin ym. (2004) mukaan hyvin kirjoitetut ohjeet ja tehokkaat työkalut auttavat todennäköisesti parantamaan saavutettavuutta, kun taas huonosti kirjoitetut ohjeet ja vaikeasti käytettävät ohjelmistotyökalut voivat olla esteenä saavutettavuudelle. Zainan ym. (2022) mukaan varsinkaan käytännönläheistä tietoa saavutettavien mobiilikäyttöliittymien suunnittelusta ei ole paljoa saatavilla. Siksi he ovat tutkimuksensa pohjalta luoneet konkreettisemmat mobiilikäyttöliittymien suunnittelumalleihin kohdistuvat saavutettavuusohjeet, joissa esitellään GIF-animaatioita hyödyntäen suunnittelumallikohtaisesti mallin saavutettavuusongelmat sekä ohjeet ongelmien välttämiseksi. Tutkimuksessa keskitytään erityisesti navigointiin liittyviin suunnittelumalleihin (Zaina ym., 2022).

Monet kehittäjien antamista syistä olla noudattamatta saavutettavuusohjeita eivät kuitenkaan liity taidon puutteeseen tai saavutettavuusohjeiden



epäselvyyteen. Esimerkiksi Lazarin ym. (2004) tutkimuksessa osa kehittäjistä kertoi panostavansa mieluummin esteettiseen ulkoasuun kuin saavutettavuuteen. Myös Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksessa kehittäjät mainitsivat saavutettavuusohjeiden noudattamisella olevan negatiivisia vaikutuksia estetiikkaan ja käytettävyyteen.

Vaikka saavutettavuusohjeiden noudattamisella on havaittu olevan hyvä vaikutus mobiilisovelluksen saavutettavuuteen, on myös saavutettavuusohjeissa parantamisen varaa. Tutkimukset osoittavat, että saavutettavuusohjeet kattavat vain noin puolet tutkimuksissa löydetyistä ongelmista (Mateus ym., 2020). Myös verkkosivuja koskevassa tutkimuksessa saatiin samanlaisia tuloksia (Power ym., 2012). Pelkkä saavutettavuusohjeiden noudattaminen ei siis vielä takaa saavutettavaa lopputulosta.

### 3.3 Saavutettavuustestaus

Saavutettavuuden arviointi on tärkeä tekijä saavutettavan mobiilisovelluksen kehittämisessä (Silva ym., 2018). Saavutettavuuden arviointi toteutetaan useimmiten vertaamalla sovellusta olemassa oleviin saavutettavuusohjeisiin kuten WCAG 2.0 (Mateus ym., 2020; Silva ym., 2018; Yan & Ramachandran, 2019). Saavutettavan mobiilisovelluksen kehittämiseksi tulee noudattaa saavutettavuuskäytäntöjä, ja valvoa niiden noudattamista (Silva ym., 2018). Arviointi voidaan suorittaa joko manuaalisesti tai automaattisesti. Tutkijat suosittelevat näiden yhdistämistä (Mäkipää ym., 2022).

Saavutettavuuden noudattamista valvotaan tavallisesti manuaalisesti apuvälineitä tarvitsevien käyttäjien näkökulmasta (Silva ym., 2018). Tämä on usein työlästä, mikä johtaa helposti huolimattomuuteen (Silva ym., 2018). Yksi ratkaisu tähän ongelmaan on automaatio, joka on usein nopeampaa, helpommin toistettavaa ja tarkempaa (Silva ym., 2018). Yan ja Ramachandran (2019) tukevat tätä mainitsemalla automaation yhtenä saavutettavuustestauksen onnistumisen mahdollistajana. Tutkimuksessa kuitenkin todetaan myös automaattisen testauksen vaativan paljon aikaa ja ihmisresursseja. Kustannusten arvioimiseen voitaisiin kuitenkin vaikuttaa tiedostamalla, mitkä ongelmat ovat testattavissa automaattisesti, ja minkä ominaisuuksien tunnistamiseen tarvitaan manuaalista testausta (Yan & Ramachandran, 2019). Mobiilisovellusten automaattisessa saavutettavuustestauksessa on vielä paljon puutteita, ja sillä voi testata vain osaa saavutettavuusohjeista (Silva ym., 2018; Yan & Ramachandran, 2019). Myös WAI Billin ym. (2010) mukaan tukee väitettä sanoen, ettei automaattinen testaaminen takaa saavutettavaa lopputulosta, vaan tarjoaa ainoastaan pohjan, josta aloittaa.

Silvan ym. (2019) tutkimuksessa tutkittiin 15 eri automaattiseen saavutettavuustestaukseen tarkoitettua työkaluja. Tutkimuksessa tutkituista työkaluista kaikki testasivat vaihtoehtoja ei-tekstuaalisille elementeille (Silva ym., 2018). Seuraavaksi yleisimpiä työkalujen huomioimia ominaisuuksia olivat värikontrasti, elementin koko ja välit (Silva ym., 2018). Sen sijaan aikakatkaisut, näppäimistön

ohjaus ja tarkennus olivat huomioituina hyvin harvoissa työkaluissa (Silva ym., 2018).

Manuaalista testausta tarvitaan, koska automaattiseen saavutettavuustestaukseen tarkoitettut työkalut eivät kata läheskään kaikkia vaadittuja saavutettavuusvaatimuksia ja -suosituksia (Silva ym., 2018). Yanin ja Ramachandranin (2019) tutkimuksessa testaukseen käytetty MAC tunnisti 67 prosenttia saavutettavuusongelmista verrattuna WCAG-saavutettavuusohjeisiin. Jaegerin (2006) mukaan automaattiset työkalut voivat olla hyödyllisiä, mutta eivät riitä yksistään. Silvan ym. (2018) tutkimuksessa käsitellyt työkalut kattoivat yhdessä vain noin 13 prosenttia BBC:n ja W3C:n esittämistä vaatimuksista, mikä voi johtua siitä, että monet sovellukset keskittyvät vain helposti automaattisesti testattaviin ominaisuuksiin. On tärkeää tietää, mitä ominaisuuksia voidaan testata automaattisesti, ja mitä vain käyttäjät voivat tunnistaa (Mateus ym., 2020).

Sovellusten saavutettavuutta vammaisten ihmisten näkökulmasta arvioitaessa parhaita tuloksia saadaan, kun testauksessa käytetään vammaisia koehenkilöitä (Jaeger, 2006). Mateuksen ym. (2020) tutkimuksessa kävi ilmi, että koehenkilöt pystyvät tunnistamaan useampia erilaisia ongelmia, mutta automaattiset työkalut pystyvät helpommin tunnistamaan saman ongelman kaikki esiintyvyydet.

Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksen mukaan vain hyvin pieni osa sovel-luskehittäjistä käyttää työkaluja apuna saavutettavuuden testaamisessa. Suurin osa testaamisesta tehdään edelleen manuaalisesti (Yan & Ramachandran, 2019).

### 3.4 Tietoisuus ja asenteet

Useista tutkimuksista käy ilmi, että saavutettavuuden parantamisen kannalta yksi olennaisimmista kehityskohdista on tietoisuuden lisääminen saavutettavuuteen ja saavutettavuusongelmiin liittyen. Carvalhon ym. (2016) mukaan päätöksentekijöiden ja sovellusten kehittämiseen osallistuvien ihmisten tietoisuutta saavutettavuudesta tulisi lisätä, koska sovelluksista löytyy niin paljon perustason saavutettavuusongelmia. Saavutettavuuden parantaminen ei kuitenkaan ole yhden ihmisryhmän tehtävä, vaan siihen vaaditaan valtion, yritysten johdon, it-palveluiden kehittäjien ja asiakkaiden osallistumista (Lazar ym., 2004). Parantaakseen asenteita ja sitoutumista saavutettavuuden edistämiseen johtajien tulisi ottaa mukaan erilaisia sidosryhmiä, jotta saavutettavuudesta tulisi todellisuutta (Mäkipää ym., 2022).

Julkisten palveluiden saavutettavuusvaatimuksista on usein huolehdittu lainsäädännöllä. Lainsäädäntö onkin yksi merkittävä keino parantaa saavutettavuutta. Lazarin ym. (2004) tutkimuksessa haastateltavat mainitsivat valtion määräykset yhtenä merkittävimmistä motivaattoreista saavutettavuuden parantamiseen.

Koska yksityisten yritysten tarjoamien verkkosivujen ja mobiilisovellusten saavutettavuutta ei valvota yhtä tarkasti, on tärkeää, että yrityksen johtohenkilöt ovat tietoisia saavutettavuusongelmista. Tutkimuksista käy kuitenkin ilmi, että

usein kehittäjät kokevat vaikeaksi vakuuttaa johtajat saavutettavuuden tärkeydestä (Lazar ym., 2004). Johdon tuki kehittäjille on kuitenkin tärkeää saavutettavuuden toteutumisen kannalta (Mäkipää ym., 2022).

Useista tutkimuksista käy ilmi, että sama ongelma toistuu usein myös asiakkaiden kohdalla (Lazar ym., 2004). Muun muassa Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksessa käy ilmi, että yritykset ja asiakkaat eivät ole tietoisia saavutettavuuden tärkeydestä, eivätkä siksi tahdo käyttää aikaa sovelluksen saavutettavuuden parantamiseen. Lazarin ym. (2004) mukaan lainsäädäntö ja saavutettavuustilastoista uutisointi voivat vaikuttaa asiakkaan näkemykseen saavutettavuuden tärkeydestä. Sekä kehittäjien että asiakkaiden kiinnostus saavutettavuutta kohtaan määrittää, tuleeko lopputuloksesta saavutettava (Lazar ym., 2004).

Epätietoisuus saavutettavuudesta ei kuitenkaan koske pelkästään asiakkaita ja yritysten johtajia. Sekä mobiilisovellusten kehittäjät että käyttäjäyhteisöt osoittavat tietämättömyyttä saavutettavuudesta (Yan & Ramachandran, 2019). Myös muut tutkijat nostivat tärkeimpien syiden joukkoon juuri kehittäjien tiedon puutteen saavutettavuuteen liittyen. Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksessa suurimmaksi haasteeksi saavutettavien mobiilisovellusten kehittämisessä nimettiin kehittäjien tiedon ja ymmärryksen lisääminen saavutettavuuteen ja vammaisten ihmisten tarpeisiin liittyen. Myös Silvan ym. (2018) tutkimuksesta käy ilmi, että kehittäjät eivät ole tietoisia saavutettavuusvaatimuksista.

Kehittäjien tietoisuuden parantamiseen yksi ratkaisu on saavutettavuuteen liittyvän koulutuksen lisääminen (Lazar ym., 2004). Wallerin ym. (2009) mukaan saavutettavuus tulisi huomioida paremmin osana koulutusta esimerkiksi osana ohjelmiston suunnittelu- ja kehityskursseja eikä vain erillisinä saavutettavuuskursseina (Di Gregorio ym., 2022).

Tutkimuksissa koulutuksesta nousi esiin joitain epäkohtia. Ainakaan 20 vuotta sitten saavutettavuus ei yleisesti kuulunut kansallisiin tietojenkäsittelytieteen, tietojärjestelmien tai tietotekniikan opetussuunnitelmiin (Lazar ym., 2004). Vaikka saavutettavuus vaikuttaa olevan tärkeää julkisella sektorilla, sillä ei näytä olevan samanlaista vaikutusta yksityisiin toimijoihin tai koulutukseen (Lazar ym., 2004). Lazarin ym. (2004) mukaan juuri koulutus vaikuttaa kehittäjän ratkaisuun tehdä tuotteesta saavutettava (Lazar ym., 2004), joten saavutettavuuden sisällyttämisellä paremmin osaksi koulutusta voisi olla suuri vaikutus myös saavutettavien sovellusten kehittämiseen.

Yan ja Ramachandran (2019) esittävät tutkimuksessaan idean koulutuksesta, joka keskittyisi vain yleisimmin esiintyviin elementteihin ja ongelmiin. TextView, Button, ImageView, View, ja ImageButton elementeissä oli selvästi eniten ongelmia, ja näissä elementeissä ilmeni 89 prosenttia testissä löydetyistä rikkomuksista (Yan & Ramachandran, 2019). Näissä elementeissä yleisimpiä ongelmia olivat elementin kohdistettavuuden puute, puuttuvan elementin kuvaus, alhainen tekstin värikontrasti, riittävän etäisyyden puute elementtien välillä sekä tekstin koko ja elementin koko, jotka muodostivat 97 prosenttia rikkomuksista (Yan & Ramachandran, 2019). Näin vähennettäisiin kustannuksia, mutta saataisiin aikaan merkittävä parannus (Yan & Ramachandran, 2019).

Vaikka kaikki työkalut saavutettavien sovellusten kehittämiseksi olisi saatavilla, niistä ei ole hyötyä, jos kehitystyöstä vastaavat henkilöt eivät käytä niitä. Siksi yksi tärkeä osa-alue saavutettavuuden parantamiseksi on kehittäjien asenteet saavutettavuutta kohtaan. Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksessa suositellaankin, että kehittäjiä tulisi motivoida saavutettavuuden huomioimiseen sovellusten kehittämisessä. Vaikka suurin osa Lazarin ym. (2004) tutkimukseen osallistuneista vastaajista piti saavutettavuutta tärkeänä, ja joko yritti tehdä sivustoista saavutettavia tai olisi halukas tekemään niin, jos siihen annettaisiin sopivat resurssit, pieni osa vastaajista kuitenkin piti saavutettavuutta turhana asiana, eikä olisi halukas panostamaan saavutettavuuteen, vaikka siihen olisi kaikki valmiudet ja resurssit saatavilla.

Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksen mukaan sovelluksen käyttäjäkunnan laajeneminen on merkittävä syy saavutettavuuden parantamiseen. Lazarin ym. (2004) mukaan suurin motivaattori kyselyyn vastanneille saavutettavuuden parantamiseen on tieto siitä, että vammaiset ihmiset käyttävät heidän sivustoaan (Lazar ym., 2004). Osa kehittäjistä kuitenkin kokee saavutettavuusohjeiden olevan ristiriidassa esteettisen käyttöliittymäsuunnittelun kanssa, ja panostaa mieluummin esteettiseen ulkoasuun kuin saavutettavuuteen (Di Gregorio ym., 2022; Lazar ym., 2004).

Di Gregorion ym. (2022) tutkimuksen mukaan 60 prosenttia kyselyyn vastanneista pitää saavutettavuutta erittäin tärkeänä ja 21 prosenttia tärkeänä asiana sovellusten kehitykselle. Suurin syy kehittäjille tehdä sovelluksista saavutettavia ovat heidän henkilökohtaiset motiivinsa ja etiikkansa (Di Gregorio ym., 2022). Myös Lazarin ym. (2004) tutkimuksen mukaan suurin osa vastaajista näkee saavutettavuuden eettisenä ongelmana, mutta osa heistä ei kuitenkaan pidä eettisyyttä omana vastuunaan.

Lazarin ym. (2004) tutkimuksessa toteutetuissa haastatteluissa syyksi saavutettavuuden huomiotta jättämiselle mainitaan myös rahoituksen puute. Myös Mäkipään ym. (2022) mukaan saavutettavuus vaatii resursseja. Kuitenkaan selkeää korrelaatiota saavutettavuuden ja IT-budjetin välillä ei havaittu tutkimuksissa (Yi, 2015).

## 4 YHTEENVETO

Tämän tutkielman aiheena oli mobiilisovellusten saavutettavuus. Digitalisaation seurauksena myös saavutettavuudesta on tullut tärkeä aihe, ja se on alettu huomioida viime vuosina yhä paremmin. Tutkielman tavoitteena oli löytää mobiilisovellusten yleisimmät saavutettavuusongelmat ja aiemmissä tutkimuksissa esitetyt ratkaisut saavutettavuuden parantamiseksi.

Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Lähteiksi valittiin aiheeseen liittyviä tieteellisiä lähteitä, joiden luotettavuutta arvioitiin JUFO-luokituksen perusteella. Tutkielmassa hyödynnettiin mobiilisovellusten saavutettavuutta käsittelevien lähteiden lisäksi verkkosivuihin liittyviä saavutettavuutta käsitteleviä lähteitä, koska mobiilisovelluksia koskevia tutkimuksia oli melko vähän saatavilla.

Ensimmäinen tutkimuskysymys oli ”Millaisia ongelmia mobiilisovelluksissa on saavutettavuuden kannalta?” Tutkimuksista kävi ilmi, että yleisiä saavutettavuusongelmia mobiilisovelluksissa olivat kontrastin heikkous, liian pienet interaktiiviset elementit ja välit elementtien välillä, puuttuvat tekstivastineet ei-tekstuaalisille elementeille, painikkeiden epäinformatiivinen nimeäminen, kuvat teksteistä, informaation huono järjestely sekä elementtien kohdistettavuuden puute. Nämä samat ongelmat esiintyivät monissa eri tutkimuksissa. Löydetyistä ongelmista kärsivät huomattavasti useimmin näkövammaiset ihmiset, koska monet sovellukset aiheuttivat ongelmia näytönlukijalle.

Toinen tutkimuskysymys oli ”Miten mobiilisovelluksia voidaan kehittää saavutettavammiksi?” Tutkimusten mukaan saavutettavuus tulisi huomioida mobiilisovellusten kehittämisessä mahdollisimman alkuvaiheessa, ja kehitystyön pitäisi olla käyttäjälähtöistä. Toinen keino saavutettavuuden parantamiseen on saavutettavuusohjeiden noudattaminen. Mobiilisovellusten saavutettavuutta tulisi valvoa saavutettavuustestauksen avulla mieluiten manuaalista ja automaattista testausta yhdistämällä. Suurin muutos kuitenkin tarvittaisiin saavutettavuuteen liittyvään tietoisuuteen ja asenteisiin, jotta olemassa olevat parannuskeinot otettaisiin käyttöön saavutettavien mobiilisovellusten kehittämiseksi. Tähän on esitetty ratkaisuksi muun muassa saavutettavuuden lisäämistä

vahvemmin osaksi koulutusta ja uutisoimalla tai muuten tuomalla esille mediassa enemmän saavutettavuuteen liittyviä asioita.

Tutkielmassa kävi ilmi, että saavutettavuusongelmat koskivat erityisesti sokeita ja näkövammaisia ihmisiä. Heille on kehitetty avustavia teknologioita, jotka ovat useimpien tutkimusten mukaan hyvällä tasolla. Mobiilisovellusten saavutettavuudessa sen sijaan on vielä paljon ongelmia, jotka estävät sovellusten käytön avustavalla teknologialla. Mobiilisovellusten saavutettavuuden parantamiseen on kehitetty useita erilaisia ohjeita, jotka olivat keskeisessä osassa useita tutkimuksia. Näistä W3C:n saavutettavuusohjeet on nostettu selvästi useimmin esiin tutkimuksissa, mutta myös muita ohjeita on saatavilla. Ongelmana on kuitenkin, että saavutettavuusohjeita ei noudateta erinäisistä syistä. Syiksi on löydetty muun muassa tiedon, taidon, resurssien ja motivaation puute. Myös saavutettavuusohjeiden epämääräisyyttä on kritisoitu. Saavutettavuusohjeista on kuitenkin ilmestynyt tämän jälkeen uudempia paranneltuja versioita.

Kun tarkastellaan saavutettavuuden nykytilaa, on hyvä huomata, että osa tutkielmassa käytetyistä lähteistä on vanhoja, ja siksi tilanne voi olla muuttunut. Esimerkiksi asenteisiin liittyviä tutkimuksia tarkastellessa on huomattavissa, että erityisen paljon asenteisiin liittyviä ongelmia löytyi hieman vanhemmasta tutkimuksesta. Sen sijaan uudemmissa tutkimuksissa vastaajat vaikuttivat pitävän saavutettavuutta tärkeänä asiana. Voisi siis päätellä, että saavutettavuuteen liittyvät asenteet ovat kehittyneet parempaan suuntaan viime vuosien aikana, kun se on alettu huomioida paremmin muun muassa lainsäädännössä. Saavutettavuuden tila vaikuttaisi muiltakin osin olevan muuttumassa parempaan suuntaan.

Tutkielman rajoitteena oli mobiilisovellusten saavutettavuutta käsittelevien tutkimusten vähäisyys, joten tutkielmassa jouduttiin hyödyntämään lisäksi verkkosivujen saavutettavuutta koskevia tutkimuksia. Myöskään tietojärjestelmätieteen merkittävimmiltä julkaisijoilta ei löytynyt paljon saavutettavuutta käsitteleviä artikkeleja, mikä puolestaan vaikutti tutkielmassa käytettyjen lähteiden laatuun. Tämän takia tutkielmassa onkin hyödynnetty melko paljon konferenssijulkaisuja, joista on kuitenkin tarkistettu Julkaisufoorumin luokitus. Lisäksi suuri osa artikkeleista käsittelee saavutettavuutta näkövammaisten ihmisten näkökulmasta, joten myös tutkielman sisältö painottuu melko vahvasti näkövammaisten näkökulmaan. Toisaalta näkövammaisten kohtaamien saavutettavuusongelmien tutkiminen on perusteltua, sillä he myös kohtaavat eniten haasteita saavutettavuuteen liittyen käyttäessään mobiilisovelluksia.

Lisää tutkimusta tarvittaisiin saavutettavuuteen liittyen erityisesti mobiilisovellusten osalta. Suuri osa tutkimuksista keskittyy näkövammaisten ihmisten saavutettavuusongelmiin, joten myös muiden ihmisten kohtaamista saavutettavuusongelmista tarvittaisiin lisää tutkimusta. Erityisesti mobiilisovellusten osalta tarvittaisiin monipuolisemmin tutkimusta kaikenlaisten käyttäjien näkökulmasta.

## LÄHTEET

- Al-Razgan, M., Almoaiqel, S., Alrajhi, N., Alhumejani, A., Alshehri, A., Alnefaie, B., Alkhamiss, R., & Rushdi, S. (2021). A systematic literature review on the usability of mobile applications for visually impaired users. *PeerJ Computer Science*, 7, e771. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.771>
- Balaji, V., & Kuppusamy, K. S. (2016). Accessibility analysis of e-governance oriented mobile applications. *2016 International Conference on Accessibility to Digital World*, 141–144. <https://doi.org/10.1109/ICADW.2016.7942529>
- BBC. (2024, helmikuuta 20). *Mobile Accessibility Guidelines – Accessibility for Products – BBC*. <https://www.bbc.co.uk/accessibility/forproducts/guides/mobile>
- Billi, M., Burzagli, L., Catarci, T., Santucci, G., Bertini, E., Gabbanini, F., & Palchetti, E. (2010). A unified methodology for the evaluation of accessibility and usability of mobile applications. *Universal Access in the Information Society*, 9, 337–356. <https://doi.org/10.1007/s10209-009-0180-1>
- Brophy, P., & Craven, J. (2007). Web Accessibility. *Library Trends*, 55(4), 950–972. <https://doi.org/10.1353/lib.2007.0029>
- Caldwell, B., Cooper, M., Reid, L. G., & Vanderheiden, G. (2011). *Verkkosisällön saavutettavuusohjeet (WCAG) 2.0*. <https://www.w3.org/Translations/WCAG20-fi/>
- Carvalho, L. P., Peruzza, B. P. M., Santos, F., Ferreira, L. P., & Freire, A. P. (2016). Accessible smart cities? Inspecting the accessibility of Brazilian municipalities' mobile applications. *Proceedings of the 15th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, 1–10. <https://doi.org/10.1145/3033701.3033718>
- Carvalho, M. C. N., Dias, F. S., Reis, A. G. S., & Freire, A. P. (2018). Accessibility and usability problems encountered on websites and applications in mobile devices by blind and normal-vision users. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing, 2022–2029*. <https://doi.org/10.1145/3167132.3167349>
- de Oliveira, G. A. A., de Bettio, R. W., & Freire, A. P. (2016). Accessibility of the smart home for users with visual disabilities: An evaluation of open source mobile applications for home automation. *Proceedings of the 15th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, 1–10. <https://doi.org/10.1145/3033701.3033730>
- Di Gregorio, M., Di Nucci, D., Palomba, F., & Vitiello, G. (2022). The making of accessible Android applications: An empirical study on the state of the practice. *Empirical Software Engineering*, 27, 145. <https://doi.org/10.1007/s10664-022-10182-x>

- Ferreira, J. M., Acuña, S. T., Dieste, O., Vegas, S., Santos, A., Rodríguez, F., & Juristo, N. (2020). Impact of usability mechanisms: An experiment on efficiency, effectiveness and user satisfaction. *Information and Software Technology*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.106195>
- FINLEX® - Säädökset alkuperäisinä: Laki digitaalisten palvelujen tarjoamisesta 306/2019. (2019, maaliskuuta 5). Oikeusministeriö. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190306>
- FINLEX® – Sopimustekstit. (2016). Oikeusministeriö. [https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/2016/20160027/20160027\\_2#idm46434450111840](https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/2016/20160027/20160027_2#idm46434450111840)
- Hoehle, H., & Venkatesh, V. (2015). Mobile Application Usability: Conceptualization and Instrument Development. *MIS Quarterly*, 39(2), 435–472. <https://www.jstor.org/stable/26628361>
- Jaeger, P. T. (2006). Assessing Section 508 compliance on federal e-government Web sites: A multi-method, user-centered evaluation of accessibility for persons with disabilities. *Government Information Quarterly*, 23(2), 169–190. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2006.03.002>
- Kane, S. K., Wobbrock, J. O., & Ladner, R. E. (2011). Usable gestures for blind people: Understanding preference and performance. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 413–422. <https://doi.org/10.1145/1978942.1979001>
- Kim, H. K., Han, S. H., Park, J., & Park, J. (2016). The interaction experiences of visually impaired people with assistive technology: A case study of smartphones. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 55, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.07.002>
- Kirkpatrick, A., O'Connor, J., Campbell, A., & Cooper, M. (2018). *Verkkosisällön saavutettavuusohjeet (WCAG) 2.1*. <https://www.w3.org/Translations/WCAG21-fi/>
- Kocieliński, D., & Brzostek-Pawłowska, J. (2013). Improving the accessibility of touchscreen-based mobile devices: Integrating Android-based devices and Braille notetakers. *2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, 655–658. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6644073>
- Lazar, J., Dudley-Sponaugle, A., & Greenidge, K.-D. (2004). Improving web accessibility: A study of webmaster perceptions. *Computers in Human Behavior*, 20(2), 269–288. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2003.10.018>
- Leporini, B., Buzzi, M. C., & Buzzi, M. (2012). Interacting with mobile devices via VoiceOver: Usability and accessibility issues. *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference*, 339–348. <https://doi.org/10.1145/2414536.2414591>



- Mateus, D. A., Silva, C. A., Eler, M. M., & Freire, A. P. (2020). Accessibility of mobile applications: Evaluation by users with visual impairment and by automated tools. *Proceedings of the 19th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, 1–10.  
<https://doi.org/10.1145/3424953.3426633>
- Mäkipää, J.-P., Norrgård, J., & Vartiainen, T. (2022). Factors Affecting the Accessibility of IT Artifacts: A Systematic Review. *Communications of the Association for Information Systems*, 51, 666–702.  
<https://doi.org/10.17705/1CAIS.05129>
- Patch, K., Spellman, J., & Wachter, K. (2015). *Mobile Accessibility: How WCAG 2.0 and Other W3C/WAI Guidelines Apply to Mobile*.  
<https://www.w3.org/TR/mobile-accessibility-mapping/>
- Pichiliani, M. C., & Hirata, C. M. (2015). Evaluation of the Android Accessibility API Recognition Rate Towards a Better User Experience. Teoksessa M. Antona & C. Stephanidis (Toim.), *Universal Access in Human-Computer Interaction. Access to Today's Technologies* (ss. 340–349). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-20678-3\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20678-3_33)
- Power, C., Freire, A., Petrie, H., & Swallow, D. (2012). Guidelines are only half of the story: Accessibility problems encountered by blind users on the web. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 433–442. <https://doi.org/10.1145/2207676.2207736>
- Salminen, A. (2011). *Mikä kirjallisuuskatsaus? : Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyyppeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin*. Vaasan yliopisto.  
<https://osuva.uwasa.fi/handle/10024/7961>
- Silva, C., Eler, M. M., & Fraser, G. (2018). A survey on the tool support for the automatic evaluation of mobile accessibility. *Proceedings of the 8th International Conference on Software Development and Technologies for Enhancing Accessibility and Fighting Info-exclusion*, 286–293.  
<https://doi.org/10.1145/3218585.3218673>
- Suomalainen, J. (2021, syyskuuta 29). Aluehallintovirasto on käynnistänyt mobiilisovellusten saavutettavuuden kattavan valvonnan. *Saavutettavuusvaatimukset*.  
<https://www.saavutettavuusvaatimukset.fi/aluehallintovirasto-on-kaynnistanyt-mobiilisovellusten-saavutettavuuden-kattavan-valvonnan/>
- Theofanos, M. F., & Redish, J. G. (2003). Bridging the gap: Between accessibility and usability. *Interactions*, 10(6), 36–51.  
<https://doi.org/10.1145/947226.947227>
- Yan, S., & Ramachandran, P. G. (2019). The Current Status of Accessibility in Mobile Apps. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 12(1), 1–31.  
<https://doi.org/10.1145/3300176>

- Yi, Y. J. (2015). Compliance of Section 508 in public library systems with the largest percentage of underserved populations. *Government Information Quarterly*, 32(1), 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2014.11.005>
- Zaina, L. A. M., Fortes, R. P. M., Casadei, V., Nozaki, L. S., & Paiva, D. M. B. (2022). Preventing accessibility barriers: Guidelines for using user interface design patterns in mobile applications. *Journal of Systems and Software*, 2021, 111213. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111213>