



TAL TECH

Parvlaeva Estonia kereplaadistuse materjalikatsete raport

Uuringuaruanne

7.12.2023

Uuringu tellija nimi: Ohutusjuurdluse Keskus

Uuringu autorid:

Mihkel Kõrgesaar, Laevaehituse professor

Mart Saarna, Mehaaniliste katsetuste ekspert

Andrus Šults, Insener

Tallinna Tehnikaülikool, Kuressaare Kolledz

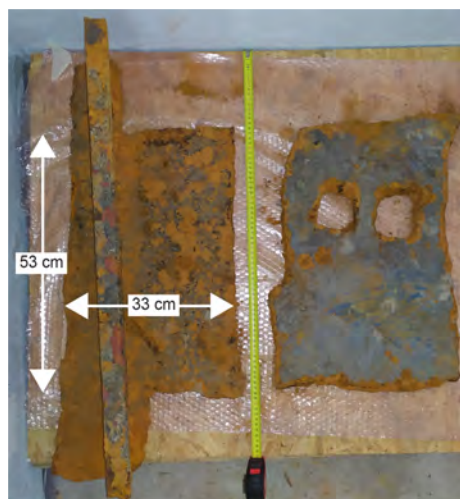
Telefon: 53439557

E-post: mihkel.korgesaar@taltech.ee

Tallinna 19, Kuressaare

1 Sissejuhatus

Töö eesmärk on määrata kahe korrodeerunud terasplaadi materjali mehaanilised omadused. Plaatide geomeetria koos nominaalse lehe paksusega on näidatud Joonisel 1. Nominaalne lehe paksus mõõdeti peale rooste eemaldamist ja seda protsessi on põhjalikumalt kirjeldatud peatükis 2. Materjali mehaanilised omadused määrati tõmbeteimi abil koormates plaatidest väljalõigatud katsekehi kuni purunemiseni. Sooritati kaks erinevat katset: 1) standardne koera-kondi tõmbekatse (edaspidi DB - dogbone) ja 2) sisselõikega katsekeha tõmbekatse lühendiga NT (notched tension). DB katsekeha kasutati pinge ja deformatsiooni kõvera määramiseks ning NT katsekeha materjaliomaduste valideerimiseks. Katsekehad jaotati terasplaatidele nii, et saavutada maksimaalne katsekehade arv. Katsekehad lõigati plaadist välja kas 0 (katsekeha nimes lühend L) kraadise või 90 kraadise nurga all (katsekeha nimes lühend T), et analüüsida materjali orientatsiooni mõju terase omadustele. Katse käigus salvestati tõmbejõud ja katsekeha pikenemine. Samuti kasutati kõikides katsetes Aramis digitaalset mõõtesüsteemi, mille abil salvestati katse käigus video katsekeha pinnast. Analüüsi faasis kasutati salvestust katsekehas tekkivate deformatsioonide määramiseks.



Plaat 1 (t = 18.5 mm)

Plaat 2 (t = 27 mm)

Joonis 1: Tellija poolt antud korrodeerunud terasplaadid. Viitamise huvides on plaadid nummerdatud nagu pildi all märgitud.

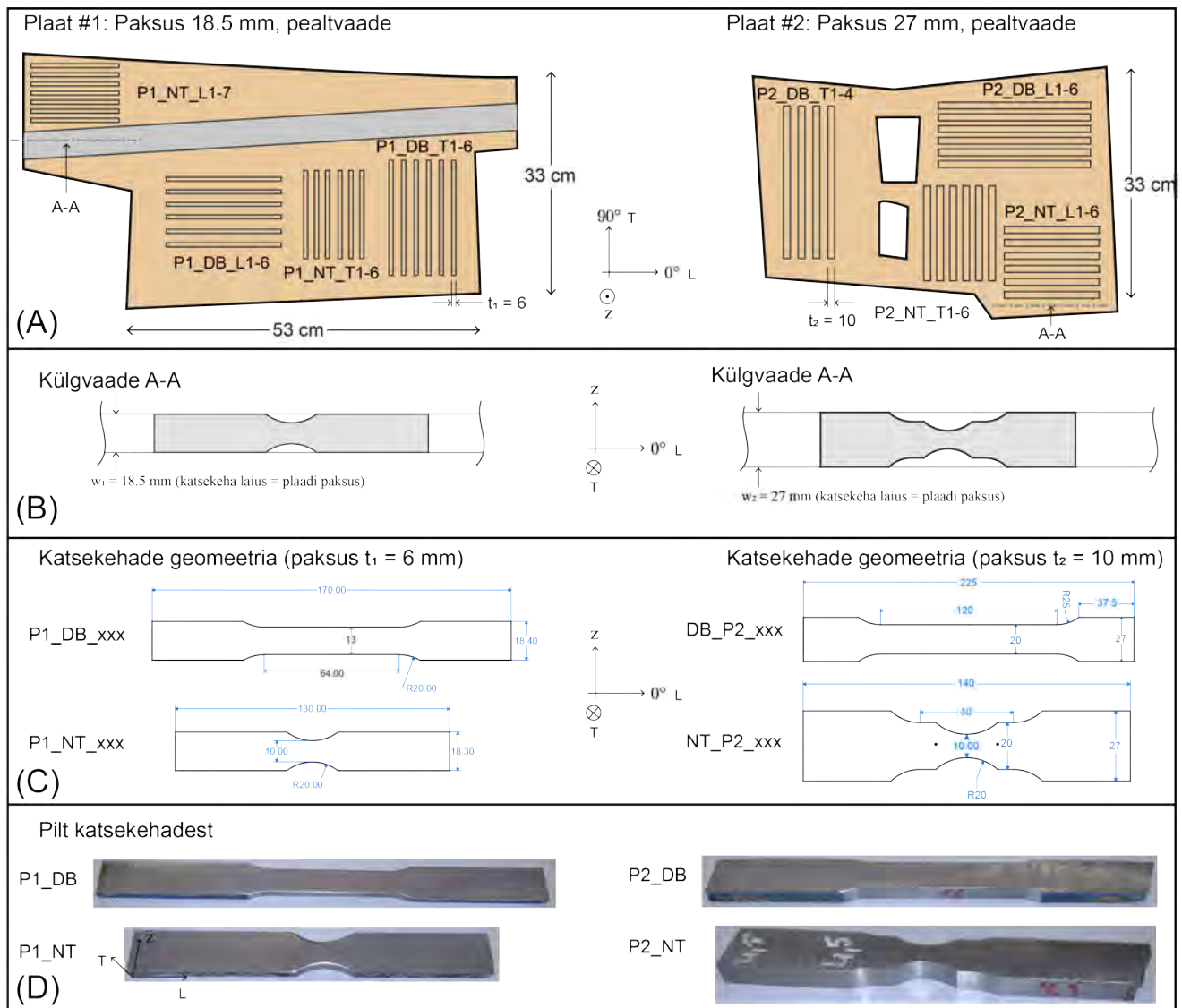
2 Katsed

2.1 Katsekehade valmistamine

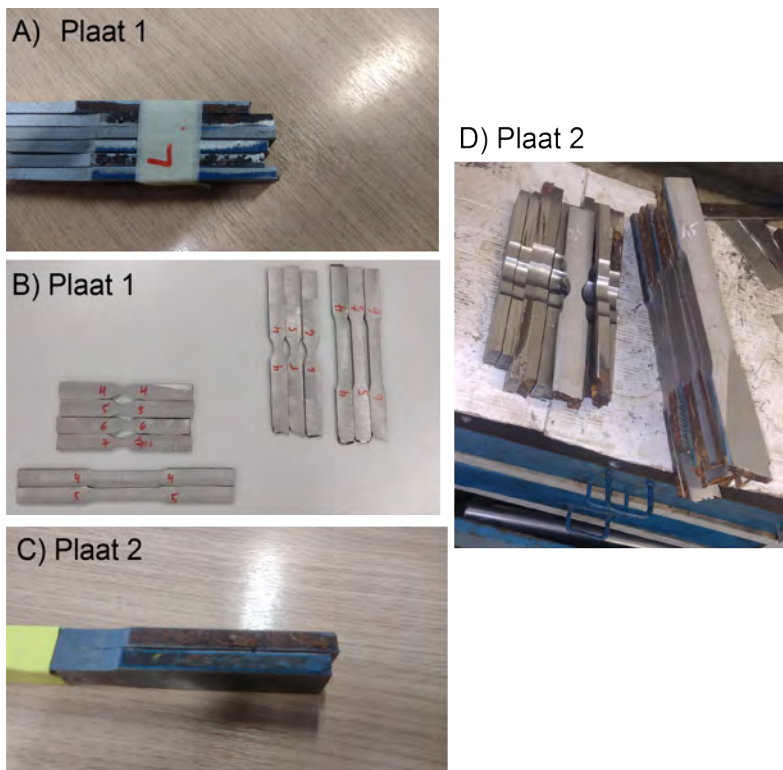
Katsekehade lõikamisskeem on näidatud Joonisel 2 (A). Katsekehad lõigati plaadist välja risti plaadi pinnaga lintsaega ja lõplik kuju saavutati freesi abil. Nii jäi katsekehade nominaallaiuseks plaadi esialgne paksus (Joonis 2 (B) ja (C)). Joonisel 3 on näidatud fotod katsekehadest.

Joonisel 3 (A) ja (C) on näha katsekehade servad peale puhastamist lahtisest roostest ning sinisest värvist. Peale neid protseduure on mõõdetud plaadi (mitte katsekehade) paksused. Plaadi 1 paksuseks peale puhastamist saadi ~18.5 mm ja Plaadi 2 paksuseks ~27 mm.

Katsekehade paksuse valikul lähtuti standardite soovitustest DB katsekeha deformeeruva osa kujule (pikkuse/laiuse/paksuse suhe). Nii saadi lõigatud katsekehade nominaalseks paksuseks $t_1 = 6$ mm (Plaat 1) ja $t_2 = 10$ mm (Plaat 2). Materjali orientatsiooni mõju uurimiseks lõigati katsekehad plaadi piki- (L) ja ristisuunast (T), kus suunad on määratud vastavalt Joonise 2 keskel olevale paremakäe koordinaatsüsteemile. Eesmärk oli saada 6 katsekeha suuna ja katsekeha tüübi kohta. Kogu katsemaatriks on näidatud Tabelis 1. Vastavalt tellija soovile kõiki katsekehi puruks ei tõmmatud. Need katsekehad on Tabelis markeeritud märkega "Säilitada" ning antakse tellijale üle koos raportiga.



Joonis 2: Katsekehade geomeetria ja lõikamisskeem. Vasakul plaat 1, paremal plaat 2.



Joonis 3: Lõigatud katsekehad.

Tabel 1: Katsemaatriks koos metaandmetega.

Plaat 1

Katsekeha nimi	Lõigatud	Katse	Paksus (mm)	Laius (mm)
P1_DB_T1	jah	jah	5.86	13.00
P1_DB_T2	jah	jah	5.81	13.01
P1_DB_T3	jah	jah	5.85	13.06
P1_DB_T4	jah	Säilitada		
P1_DB_T5	jah	Säilitada		
P1_DB_T6	jah	Säilitada		
P1_DB_L1	jah	jah	5.85	13.01
P1_DB_L2	jah	jah	5.76	13.12
P1_DB_L3	jah	jah	5.92	13.08
P1_DB_L4	jah	Säilitada		
P1_DB_L5	jah	Säilitada		
P1_NT_T1	jah	jah	5.86	10.08
P1_NT_T2	jah	jah	5.67	10.01
P1_NT_T3	jah	jah	5.80	9.91
P1_NT_T4	jah	Säilitada		
P1_NT_T5	jah	Säilitada		
P1_NT_T6	jah	Säilitada		
P1_NT_L1	jah	jah	5.74	9.70
P1_NT_L2	jah	jah	5.65	8.75
P1_NT_L3	jah	jah	6.01	8.87
P1_NT_L4	jah	Säilitada		
P1_NT_L5	jah	Säilitada		
P1_NT_L6	jah	Säilitada	Valmistuse defekt	
P1_NT_L7	jah	Säilitada	Valmistuse defekt	

DB Kehadel on katse kiirus 1 = 0,75 mm/min (kuni 0,8 %). Kiirus 2 on 15 mm/min (purunemiseni)
NT kehadel on katse kiirus 5 mm/min

Plaat 2

Katsekeha nimi	Lõigatud	Katse	Paksus (mm)	Laius (mm)
P2_DB_L1	JAH	JAH	10,13	20
P2_DB_L2	JAH	JAH	10,14	20
P2_DB_L3	JAH	JAH	10,12	20
P2_DB_L4	JAH	Säilitada	10	
P2_DB_L5	JAH	Säilitada	10	
P2_DB_L6	JAH	Säilitada	10	
P2_DB_T1	JAH	JAH	10,15	20
P2_DB_T2	JAH	JAH	10,15	20
P2_DB_T3	JAH	Säilitada	10	
P2_DB_T4	JAH	Säilitada	10	
P2_NT_T1	JAH	JAH	10	10
P2_NT_T2	JAH	JAH	10	10
P2_NT_T3	JAH	JAH	10	10
P2_NT_T4	JAH	Säilitada	10	
P2_NT_T5	JAH	Säilitada	10	
P2_NT_T6	JAH	Säilitada	10	
P2_NT_L1	JAH	JAH	10	10
P2_NT_L2	JAH	JAH	10	10
P2_NT_L3	JAH	JAH	10	10
P2_NT_L4	JAH	Säilitada	10	
P2_NT_L5	JAH	Säilitada	10	
P2_NT_L6	JAH	Säilitada	10	

2.2 Katsete läbiviimine

Kuna eesmärgiks oli materjali staatiliste tugevusomaduste määramine, siis viidi katsed läbi madalatel kiirustel. Valitud tõmbamiskiirusel Tabelis 1 lähtuti katselabori kogemustest ja kirjandusest, e.g. [1]. Mõõtmisel kasutatud Aramise süsteemi parameetrid on näidatud Tabelis 2. Katsete käigus salvestati järgmine informatsioon. Instron tõmbeteimi abil mõõdeti jõudu, millega katsekeha tõmmati ning katsekehale kinnitatud ekstensomeetri abil mõõdeti vastav katsekeha pikenemine. Samuti salvestati kogu katsekäik Aramis mõõtesüsteemi abil, mis tähendab, et kogu katsekehast tehti pilte sagedusega 15 Hz.

Tabel 2: Aramise süsteemi parameetrid katsetustel

DIC method:	Aramis 3D Stereo image surface measurement
Camera type / Lens:	12MP / 50 mm
Measuring vol. / dist.:	MVO (L:175 x W:130 x D:110) / 696 mm
Calibration obj. / deviation:	CP40/170/43505 / 0.03001
Facet size [px]	19
Step size [px]	16
Strain window [nr]	1
Pixel size [mm]	0.0425
Calc. strain ref. length (mm)	$0.8075 = (\text{Strain window} - 1) \cdot \text{Step size} + \text{Facet size}$
Tensile test method:	EN6892-1 (loading speed slightly different because of DIC)
Tensile test equipment:	Plaat 1: Instron 8516 (100 kN), Plaat 2: Instron 8802 (250 kN)
Tensile test operator:	Mart Saarna

2.3 Katsete tulemused

Iga katse kohta esitatakse tellijale exceli fail, mis sisaldab erinevaid määratud karakteristikuid. Oluliseimat sellest infost nagu materjali voolepinge σ_0 , virtuaalse ekstensomeetri pikkus L_0 , virtuaalse ekstensomeetri pikenemine ΔL ja vastav mõõdetud jõud F kasutati pinge ja deformatsiooni graafiku määramiseks.

3 Analüüs

Mõlema plaadi puhul on materjalikõvera määramiseks kasutatud sama metoodikat. Seepärast esitatakse siin peatükis meetodi üldine printsiip, mida rakendati mõlemale plaadile.

Eialgu leiti materjali nominaalsed tugevusomadused e. materjali nominaalse pinge ja deformatsiooni graafik ($\sigma_{eng} - \varepsilon_{eng}$). Selleks kasutati DB katsekehi. Nominaalne pinge σ_{eng} leiti mõõdetud jõu F ja katsekeha ristlõike algse pindala A_0 suhtena

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0}. \quad (1)$$

Nominaalne deformatsioon ε_{eng} leiti valemist

$$\varepsilon_{eng} = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (2)$$

kus ΔL on katsekeha pikenemine ja $L_0 = 50$ mm on virtuaalse ekstensomeetri esialgne pikkus. Nominaalne pinge ja deformatsiooni graafik kirjeldab eelkõige katsekeha omadusi. Materjali enda iseloomustamiseks kasutatakse tegeliku pinge ja deformatsiooni graafikut (ik. true stress-plastic strain curve $\sigma_T - \varepsilon_p$). Kuni kaela tekkeni saab seda seost määrata nominaalsete väärtuste põhjal järgmiste valemite abil

$$\sigma_T = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (3a)$$

$$\varepsilon_p = \log(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (3b)$$

Kaela tekkimise algus langeb kokku maksimaalse jõu ja maksimaalse nominaalpinge väärtusega, sest kaela tekkel hakkab ristlõike pindala vähenema. Tegelik pinge aga materjalis suureneb. Kuna tegelikku ristlõike pindala on väga keeruline mõõta ei saa kasutada valemit (2) pinge määramiseks. Seepärast kasutati $\sigma_T - \varepsilon_T$ määramiseks artiklites [2] ja [3] kirjeldatud kolmesammulist meetodit.

Esimeses sammus luuakse võimalikult mitmekülgne matemaatiline mudel, mis suudab terase tegeliku pinge ja deformatsiooni graafikut kirjeldada. Selleks võetakse kaks tuntud valemit, mida kasutatakse metallide tegeliku pinge ja deformatsiooni graafiku kirjeldamisel. Need on Voce mudel ja Swifti mudel:

$$\sigma_{T-Voce} = \sigma_0 + Q(1 - e^{-C_1 \varepsilon_p}) \quad (4a)$$

$$\sigma_{T-Swift} = A(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n \quad (4b)$$

kus koefitsiendid Q , C_1 , A , ε_{plat} ja n on muutujad, mis tuleb määrata ning parameeter ε_0 leitakse järgmiselt

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{\sigma_0}{A} \right)^{(1/n) - \varepsilon_{plat}} \quad (5)$$

Materjali kirjeldatakse nende kahe mudeli lineaarse kombinatsioonina järgmiselt:

$$\sigma_{T-Voce} = (1 - \alpha)\sigma_{T-VOCE} + \alpha\sigma_{T-Swift} \quad (6)$$

kus α on kaalukordaja, mis tuleb samuti määrata. Kui vastavad koefitsiendid ja muutujad on leitud, saab materjali kirjeldada võrrandi 6 abil ning kasutada LEM simulatsioonides.

Meetodi **teises sammus** määratakse mudeli koefitsiendid optimeerimise teel minimeerides väärtust Ψ , mis iseloomustab mõõdetud tegeliku pinge (määratud valemiga (3a) ja mudeli tegeliku pinge σ_{T-Voce} jääki

$$\psi[\alpha] = \sum_{i=1}^{N_p} (\sigma_{T-Voce-mudel}^i[\alpha] - \sigma_{T-Aramis}^i)^2 \quad (7)$$

kus i vastab kindlale deformatsiooni hetkele ja N_p näitab punktide arvu, mida on optimeerimisel kasutatud (Joonisel 4(B) näidatud punase markeriga).

Kolmandas sammus valideeritakse leitud materjali mudel. Valideerimine on vajalik kuna sammus 2 läbiviidud optimeerimine arvestas katseliselt mõõdetud punkte ainult kaela tekkeni. Suurtel deformatsioonidel võib leitud mudel olla ebatäpne. Valideerimiseks kasutati numbrilisi simulatsioone NT katsekehadega. Lähtudes katsekeha sümmeetriast loodi 1/8 mudel NT katsekehast, kus materjalina kasutatakse sammus 2 leitud mudelit.

Simulatsioon viiakse läbi samadel tingimustel nagu katse. Simulatsiooni tulemusena saadakse jõu ja deformatsiooni graafik, mida võrreldakse katsega. Kui simulatsiooni ja katsetulemused erinevad, siis materjalimudel ei vasta tegelikkusele. Mudeli parameetreid muudetakse väikestes vahemikes kuni saavutatakse piisav sarnasus simulatsiooni ja katse vahel. Saadud materjalimudel kirjeldab materjali omadusi ning antakse tellijale.

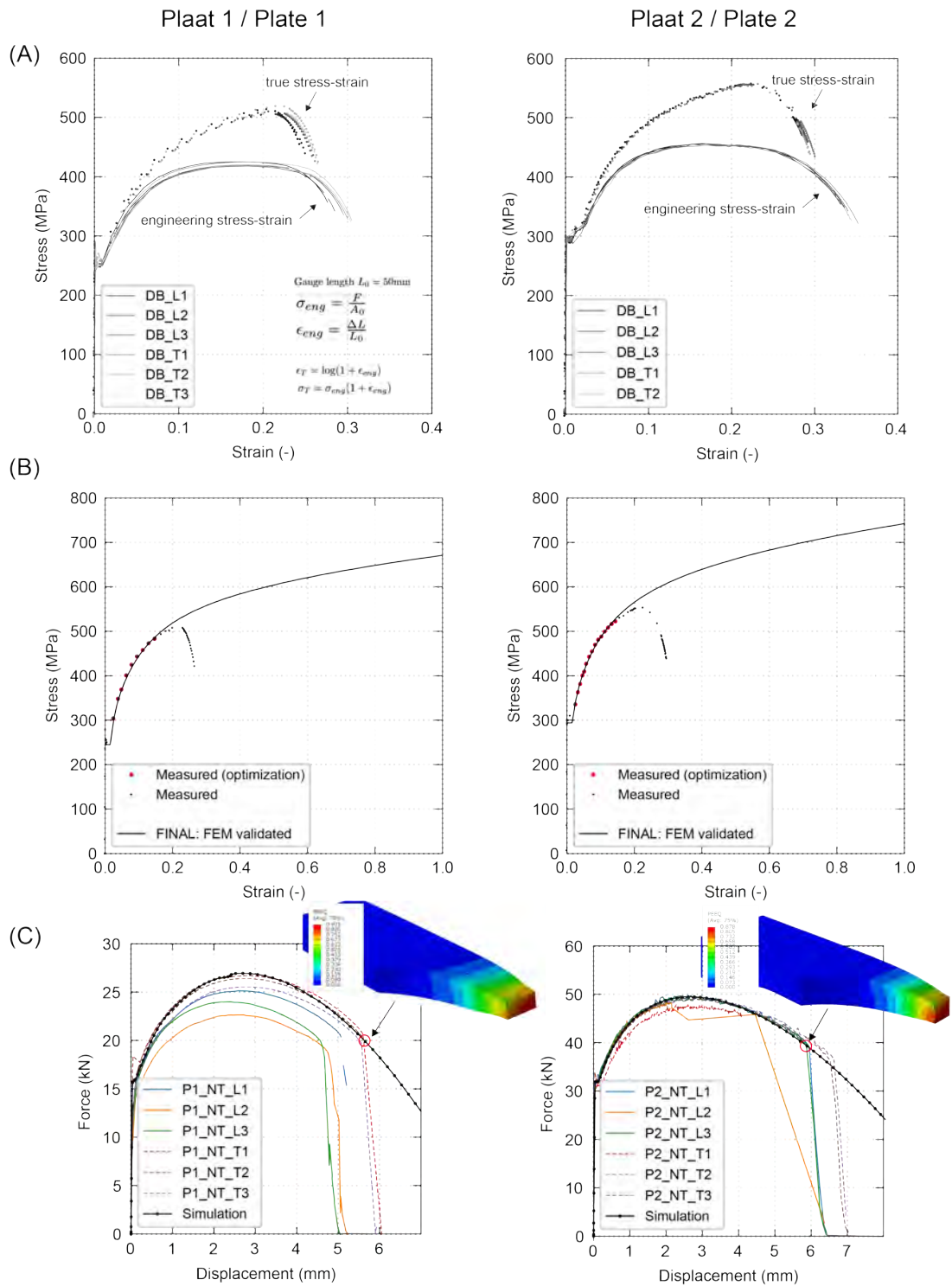
4 Tulemused

Sektsioonis 3 kirjeldatud metoodikat kasutades saadud tulemused on toodud Joonisel 4. Joonisel 4 vasakul poolel on Plaadi 1 tulemused ja paremal Plaadi 2 tulemused. Joonis 4 (A) on toodud mõõtmistulemused ning valemiga (3) arvutatud tegeliku pinge ja deformatsiooni graafikud. Mõlema plaadi puhul on erinevused katsete vahel küllaltki minimaalsed, kuid plaadi 1 puhul märgatavamad. Materjali orinetatsiooni mõju loetakse tühiseks millest järeldub, et antud teras on iseloomult isotroopne. See on konstruktsiooniteraste puhul tavapärane.

Plaadi 1 voolepinge on $\sigma_0 = 245$ MPa ja Plaadi 2 voolepinge on $\sigma_0 = 294$ MPa. Need materjalitulemused koos teiste määratud parameetritega on toodud ka Tabelis 3. Antud materjaliomaduste sisestamisel mudelisse (valemid 4-6) saame materjaliseose, mis on näidatud Joonisel 4 (B) musta värviga. Need kõverad on LEM simulatsioonidega (NT katsekehad) valideeritud nagu näidatud Joonisel 4 (C). Simulatsioonides nagu ka katsetes on NT katsekehade puhul kasutatud virtuaalset ekstensomeetrit pikkusega 30 mm.

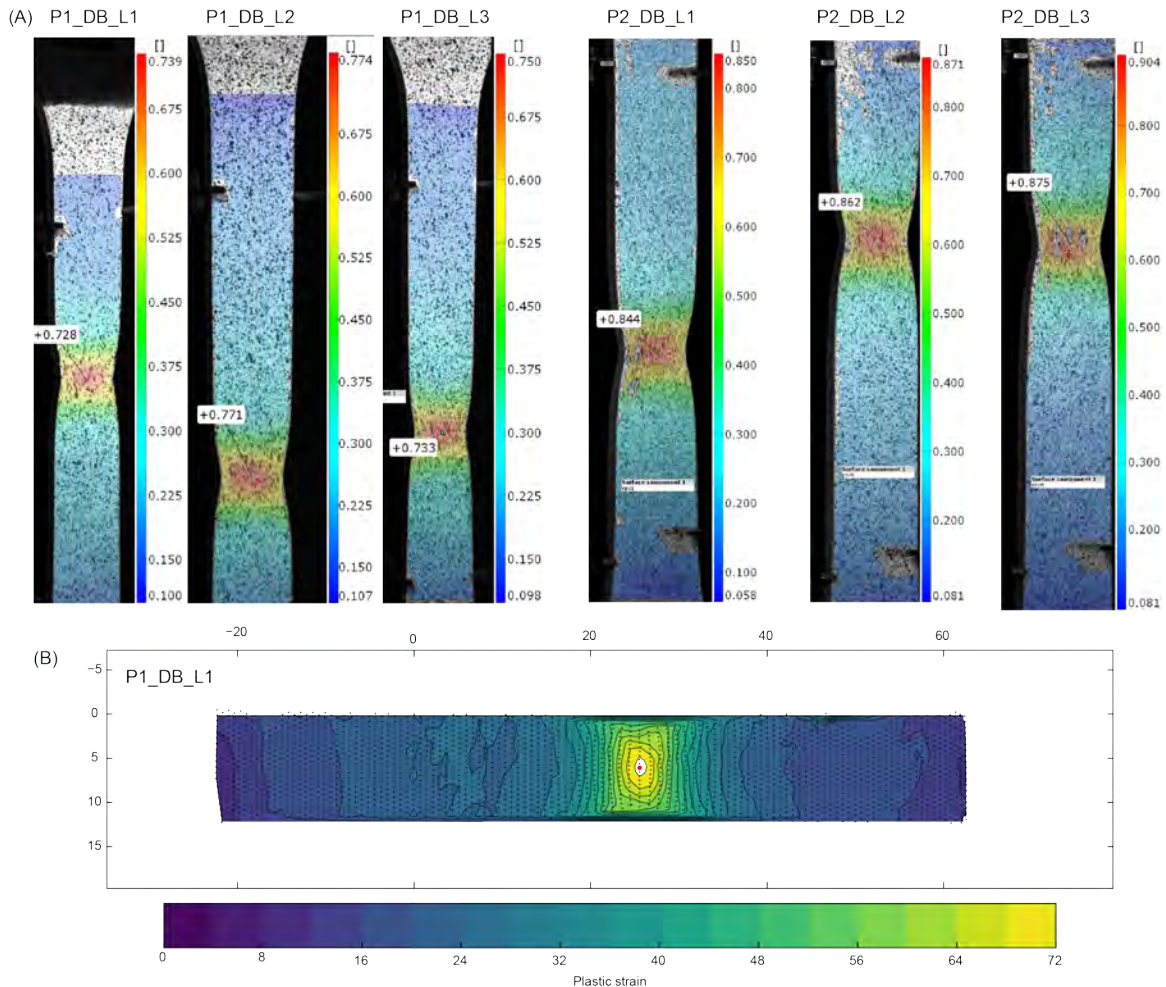
Tabel 3: Määratud materjali omadused mõlemale plaadile.

	Plaat 1	Plaat 2	
σ_0	245	294	MPa
ε_{plat}	0.02	0.02	
n	0.26	0.26	
A	1050	1050	MPa
Q	200	200	MPa
C_1	11.2116	11.2116	
α	0.3762	0.4492	
ε_0	-0.01629	-0.01252	



Joonis 4: A) Nominaalne pinged ja deformatsiooni graafik. B) Leidud tegeliku pinged ja deformatsiooni graafik. C) Valideerimine NT katsekehaga.

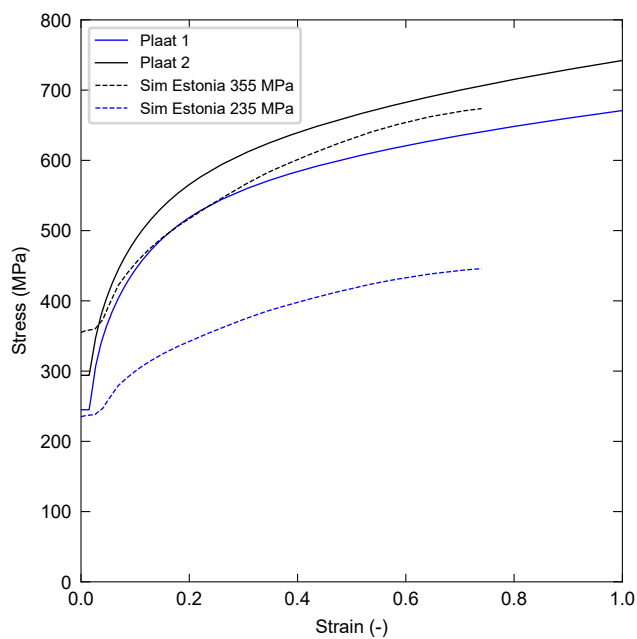
Joonisel 5 (A) on näidatud DB katsekehadel (L-suunalised) Aramisega mõõdetud von Mises deformatsioonid hetkel enne purunemist. Igale katsekehale on märgitud ka suurim saavutatud von Mises deformatsioon. Antud Aramise tulemused, mis on kuvatud pildil (A) saab soovi korral hiljem plottida iga deformatsiooni oleku kohta kasutades skripti `/Analyses/Experimental/Surface_strain_at_specific_stage.ipynb`. Illustreerimise huvides on eelnimetatud skriptiga loodud pilt näidatud Joonisel 5 (B) katsekeha P1_DB_L1 pinnal mõõdetud von Mises deformatsioonidest samal hetkel kui Joonisel 5 (A). Seega annab skript võimaluse hiljem deformatsioone soovi korral kas uurida või kontrollida.



Joonis 5: (A) von Mises deformatsioonid DB katsekeha pinnal hetk enne purunemist. (B) P1_DB_L1 katse Aramise tulemused samal ajahetkel nagu näidatud joonisel A.

Joonisel 6 on näidatud saadud materjalikõverad võrdluses parvlaeva Estonia simulatsioonides kasutatud materjalikõveratega. Erinevused kõverate vahel on küllaltki suured, kusjuures tegelik materjal on tugevam kui simulatsioonides kasutatud materjal. Selline märkimisväärne vahe tõenäoliselt mõjutab ka simulatsioonide tulemusi. Kasutades siin raportis toodud mõõdetud materjalikõveraid parvlaeva simulatsioonides peaks deformatsioonide ulatus võrreldes esialg-

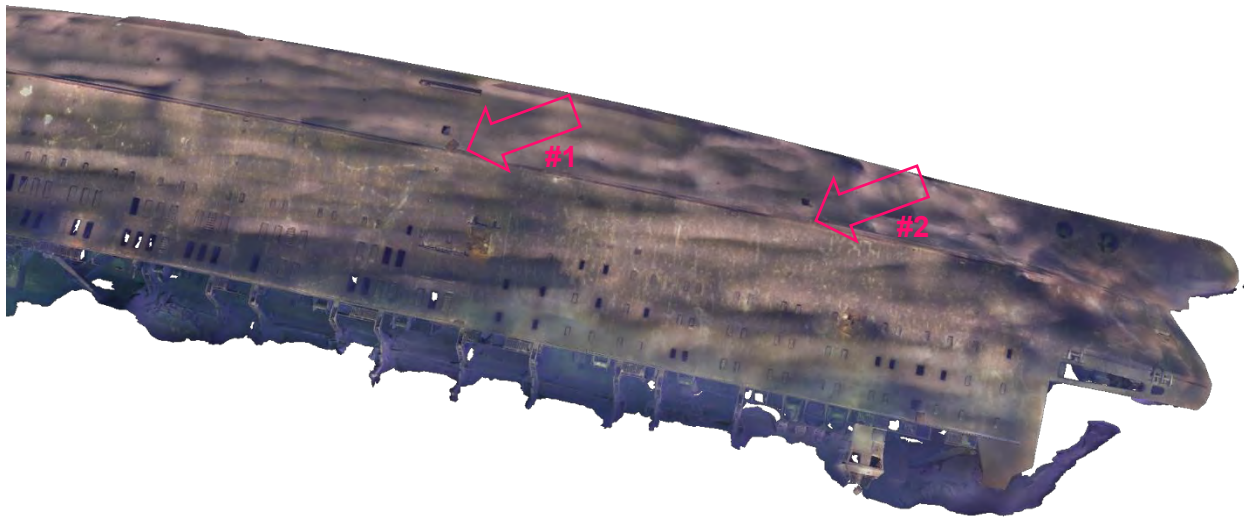
sete simulatsioonidega vähenema. Arvestades kõverate erinevusi on soovituslik parvlaeva simulatsioonid korrata uute materjalikõveratega.



Joonis 6: Materjalikõverate võrdlus.

Parvlaeva Estonia kereplaadistuse väljalõigete (materjaliproovide) päritolu

1994. aasta detsembri alguses toimunud Rootsi Mereadministratsiooni (*Sjöfartsverket*) tellitud meretööde käigus lõikasid tuukrid muuhulgas parvlaeva Estonia vraki vasakusse pardasse kaks ava, et pääseda vraki sisemust uurima. Tänu pörkeprussile ja laevakere vähesele kaldele nendes piirkondades jäi osa mõlema ava väljalõigete terasplaatidest vraki vasakule pardale avade lähedusse pidama. 2023. aasta juulis toimunud ja Rootsi Õnnetusjuhtumite Uurimise Ameti (*Statens haverikommission*) tellitud meretööde käigus toodi mõlema ava juurest üles üks terasplaat.



Joonis 1. Terasplaatide (#1 ja #2) asukohad parvlaeva Estonia vraki fotogramm-meetrilise mudeli (2022) vasakul pardal (aastatel 1994-2023). Allikas: Ohutusjuurdluse Keskus



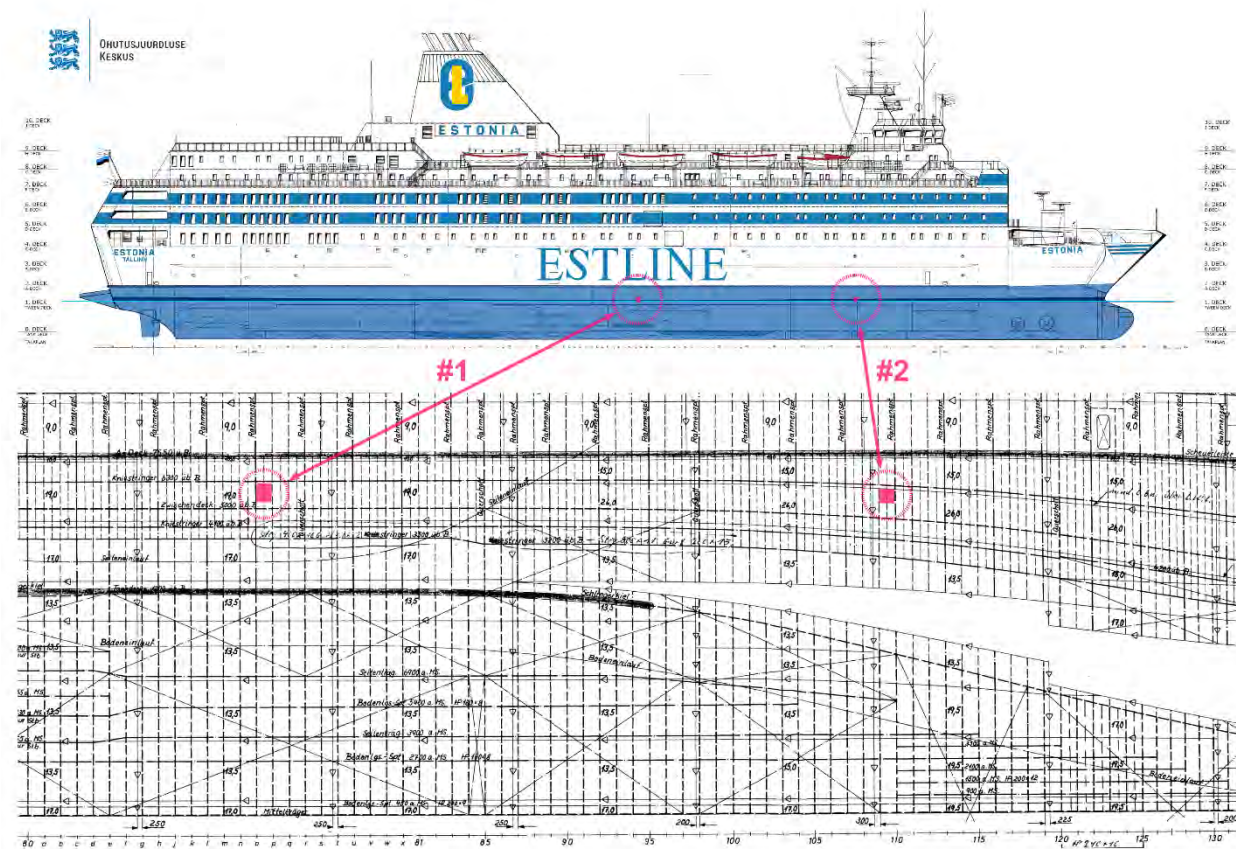
Joonis 2. Tuukrite lõigatud ava laeva keskosas (vasakul), paigast nihkunud ava katterest (keskel) ja terasplaat #1 (paremal) vraki fotogramm-meetrilisel mudelil (2022). Allikas: Ohutusjuurdluse Keskus



Joonis 3. Tuukrite lõigatud vööripoolne ava (vasakul) ja terasplaat #2 (paremal) vraki fotogramm-meetrilisel mudelil (2022). Allikas: Ohutusjuurdluse Keskus



Joonis 4. Parvlaeva Estonia vrakilt pinnale toodud terasplaadid uurimislaeva Viking Reach laevatekil 21. juulil 2023. Allikas: Tauri Roosipuu, Ohutusjuurdluse Keskus



Joonis 3. Kerepladistuse väljalõigete (#1 ja #2) asukohad parvlaeva Estonia üldjoonisel (ülemine) ja kerepladistuse joonisel (alumine, 1003 Außenhautabwicklung, 30.01.1980 [G]). Terasplaat #1 pärineb kaarte o ja p vahelt veeliini lähedalt ning joonise kohaselt on kerepladistuse paksus selles alas 19,0 mm. Terasplaat #2 pärineb kaarte 109 ja 110 vahelt veeliini lähedalt, paiknedes jäävöö ülemises servas ning joonise kohaselt on kerepladistuse paksus selles alas 26,0 mm. Allikas: Ohutusjuurdluse Keskus

LISA 2

Raportiga kaasatulevaid faile on lühidalt kirjeldatud Tabelis 4.

Tabel 4: Lisatud failid ja nende sisu lühikirjeldus.

Plaat 1	
Folder: Tellijale\Experimental\Plaat1-DB\ Summary_data_P1_DB_L1.xlsx Summary_data_P1_DB_L2.xlsx Summary_data_P1_DB_L3.xlsx Summary_data_P1_DB_T1.xlsx Summary_data_P1_DB_T2.xlsx Summary_data_P1_DB_T3.xlsx Coordinate_P1_DB_L1.npy,eps_vm_P1_DB_L1.npy Coordinate_P1_DB_L2.npy,eps_vm_P1_DB_L2.npy Coordinate_P1_DB_L3.npy,eps_vm_P1_DB_L3.npy Coordinate_P1_DB_T1.npy,eps_vm_P1_DB_T1.npy Coordinate_P1_DB_T2.npy,eps_vm_P1_DB_T2.npy Coordinate_P1_DB_T3.npy,eps_vm_P1_DB_T3.npy	Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram
Folder: Tellijale\Experimental\Plaat1-NT\ P1_NT_L1_Extensio_30.csv P1_NT_L2_Extensio_30.csv P1_NT_L3_Extensio_30.csv P1_NT_T1_Extensio_30.csv P1_NT_T2_Extensio_30.csv P1_NT_T3_Extensio_30.csv Coordinate_P1_NT_L1.npy, eps_vm_P1_NT_L1.npy Coordinate_P1_NT_L2.npy, eps_vm_P1_NT_L2.npy Coordinate_P1_NT_L3.npy, eps_vm_P1_NT_L3.npy Coordinate_P1_NT_T1.npy, eps_vm_P1_NT_T1.npy Coordinate_P1_NT_T2.npy, eps_vm_P1_NT_T2.npy Coordinate_P1_NT_T3.npy, eps_vm_P1_NT_T3.npy	Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load
Equivalent plastic strain through experiment	
Plaat 2	
Folder: Tellijale\Experimental\Plaat2-DB\ Summary_data_DB_L1.xlsx Summary_data_DB_L2.xlsx Summary_data_DB_L3.xlsx Summary_data_DB_T1.xlsx Summary_data_DB_T2.xlsx Coordinate_P2_DB_L1.npy, eps_vm_P2_DB_L1.npy Coordinate_P2_DB_L2.npy, eps_vm_P2_DB_L2.npy Coordinate_P2_DB_L3.npy, eps_vm_P2_DB_L3.npy Coordinate_P2_DB_T1.npy, eps_vm_P2_DB_T1.npy Coordinate_P2_DB_T2.npy, eps_vm_P2_DB_T2.npy	Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram Data in multiple sheets. Summary, Fracture_section_data, History_data, Section_y_data, Material instron, Aram
Equivalent plastic strain through experiment	
Folder: Tellijale\Experimental\Plaat2-NT\ P2_NT_L1_Extensio_30.csv P2_NT_L2_Extensio_30.csv P2_NT_L3_Extensio_30.csv P2_NT_T1_Extensio_30.csv P2_NT_T2_Extensio_30.csv P2_NT_T3_Extensio_30.csv Coordinate_P2_NT_L2.npy, eps_vm_P2_NT_L2.npy Coordinate_P2_NT_L3.npy, eps_vm_P2_NT_L3.npy Coordinate_P2_NT_T1.npy, eps_vm_P2_NT_T1.npy Coordinate_P2_NT_T2.npy, eps_vm_P2_NT_T2.npy Coordinate_P2_NT_T3.npy, eps_vm_P2_NT_T3.npy	Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load Colon separated info of: index, delta L, delta L %, Load
Equivalent plastic strain through experiment	
True stress strain curves	
Folder: Tellijale\ Materjal-plaat1-sim-NT-MAT1-SIMTEST3.inp Materjal-plaat2-sim-NT-MAT2-SIMTEST5.inp	True stress strain together with model parameters for plate 1 True stress strain together with model parameters for plate 2

Viited

- [1] C. C. Roth and D. Mohr, "Effect of strain rate on ductile fracture initiation in advanced high strength steel sheets: Experiments and modeling," *International Journal of Plasticity*, vol. 56, pp. 19–44, 2014.
- [2] J. H. Sung, J. H. Kim, and R. Wagoner, "A plastic constitutive equation incorporating strain, strain-rate, and temperature," *International Journal of Plasticity*, vol. 26, no. 12, pp. 1746–1771, 2010.
- [3] D. Mohr and S. J. Marcadet, "Micromechanically-motivated phenomenological hosford-coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 67-68, pp. 40–55, 2015.