



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Kuressaare Kolledž

**JÄÄ JA KONSTRUKTSIOONI VASTASMÕJU
ANALÜÜS LÕPLIKE ELEMENTIDE MEETODIL
ANALYSIS OF THE INERACTION OF ICE AND
STRUCTURE BY FINITE ELEMENT METHOD**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Indrek Rööp

Üliõpilaskood 141975SDSR

Juhendaja: Mihkel Kõrgesaar, abiprofessor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

04.12.2023.

Autor: Indrek Rööp

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

04.12.2023.

Juhendaja: Mihkel Kõrgesaar

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

15.11.2023.

Kaitsmiskomisjoni esimees: Mihkel Kõrgesaar

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Indrek Rööp

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Jää ja konstruktsiooni vastasmõju analüüs lõplike elementide meetodil“, mille juhendaja on Mihkel Kõrgesaar,
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
 2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

04.12.2023 (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
1 SISSEJUHATUS	9
2 METOODIKA JA LÄHTEKOHAD	11
2.1 Töö tagamaad.....	11
2.2 Metoodika	12
2.2.1 Numbriline meetod	12
2.2.2 Lõplike elementide meetod.....	12
2.2.3 Tarkvara	13
2.3 Töö eesmärk.....	14
2.3.1 Lähteallikad.....	14
2.4 Balti mere jää spetsiifika.....	17
2.4.1 Ida-Balti regioon	19
3 TEOREETILINE TAUST	20
3.1 Jää purunemine kehaga kokkupõrkel.....	20
3.2 Jää plastsus.....	21
3.3 Materjali progressiivne purunemine	21
3.4 Materjali ujuvus ja hõõrdumine	23
3.5 Survest tingitud purunemine	23
3.6 Nelja punkti katse	24
4 TÖÖÜLESANDE PÜSTITUS JA MUDELI LOOMINE	27
4.1 Katsekehad.....	27
4.2 Katsekehade modelleerimine	28
4.2.1 Jäätala.....	28
4.2.2 Kaldsein	29
4.3 Sisendparameetrid.....	29
4.3.1 Materjali omadused.....	29
4.3.2 Geomeetrilised parameetrid	31
4.4 Piirtingimused	33
4.5 Koormused.....	33
4.6 Kehade kontakt (vastasmõju).....	34

5	SIMULATSIOONIDE TEOSTAMINE JA TULEMUSED.....	35
5.1	Simulatsioon algparameetritega.....	35
5.2	Konstruksiooni kaldenurk.....	37
5.3	Elemendi suurus jää materjalis	37
5.4	Läbistussügavus (ingl k <i>overclosure</i>)	42
5.5	Läbistussügavuse katse $\varphi=0^\circ$ juures	46
6	TULEMUSTE ANALÜÜS.....	49
6.1	Parameetrite mõju	49
6.2	Edasine töö.....	51
7	KOKKUVÕTE	53
	SUMMARY	55
	KASUTATUD ALLIKATE LOETELU	57

EESSÕNA

Käesolev töö on kirjutatud 2023 aastal Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonnas Kuressaare Kolledžis Meretehnika ja Väikelaevaehituse eriala diplomitööna.

Täna abi eest lõputöö juhendajat Mihkel Kõrgesaart, kes pakkus teema välja ning kes aitas leida allikaid, juhendas tarkvara osas ning jagas soovitusi töö parendamiseks.

Avaldan tänu ka Mihhail Afanasjevile ning Mare Ansperile abi ja tehnilise toe eest õpingute jooksul Kuressaare Kolledžis.

Indrek Rööp

Kuressaare, Detsember 2023

Lühendite ja tähiste loetelu

Tähised

$[K]$	jäikusmaatriks
$[M]$	massimaatriks
$\{x\}$	sõlme nihkevektor
$\{f\}$	välisjõu vektor
B	jäätala laius
D	kahjuindeks (ingl k <i>Damage index</i>)
F_g	gravitatsioonijõud
G_f	purunemisenergia
g	gravitatsioonikiirendus
H	jäätala kõrgus (jäa paksus)
L	jäätala pikkus
L_e	elemendi pikkus võres
L_d	seina kaugus talast simulatsiooni alguses
L_{oc}	läbistussügavus (ingl k <i>overclosure</i>)
n	elementide arv
p_s	hüdrostaatiline rõhk
p_c	maksimaalne rõhk
t	aeg
v	kiirus
y_{eq}	libisemistegur
a	proportsionaalsus-koefitsient
α	Rayleigh'i sumbuuskordaja
δ_c	kriitiline läbistus
$\bar{\epsilon}^{pl}$	materjali suhteline plastne deformatsioon
$\bar{\epsilon}_0^{pl}$	materjali suhteline plastne deformatsioon progressiivse purunemise alguses
$\bar{\epsilon}_f^{pl}$	materjali suhteline plastne purunemisdeformatsioon
μ	hõõrdetegur
μ_k	kinemaatiline hõõrdetegur
μ_s	staatiline hõõrdetegur
ρ_w	vee tihedus
σ	näiv pinge (ingl k stress)
$\tilde{\sigma}$	tegelik pinge
σ_{y_0}	pinge punktis, kus kahjustumine algab
φ	seina nurk z-telje (vertikaaltelje) suhtes

Indeksid

c	maksimaalne, kriitiline (ingl k <i>critical</i>)
d	distant
e	element
eq	ekvivalentne
f	purunemine (ingl k <i>failure</i>)
g	gravitatsioon
k	kinemaatiline
oc	läbistussügavus (ingl k <i>overclosure</i>)
pl	plastne
s	staatiline
w	vesi (ingl k <i>water</i>)

Lühendid

CAD	ingl k <i>Computer-Aided Design</i> , raalprojekteerimine
CFD	ingl k <i>Computational Fluid Dynamics</i> , vedelikdünaamika
CAE	ingl k <i>Complete Abaqus Environment</i>
DEM	diskreetsete elementide meetod (ingl k <i>Discrete Element Method, DEM</i>)
DP	Drucker-Prageri mudel
LEA	lõplike elementide analüüs (ingl k <i>Finite Element Analysis, FEA</i>)
LEM	lõplike elementide meetod (ingl k <i>Finite Element Method, FEM</i>)
MPS	liikuvate osakeste pooleksplitsiitne (ingl k <i>Moving Particle Semi-Explicit</i>)
MS	Microsoft
SPH	silutud osakeste hüdrodünaamika (ingl k <i>Smoothed-Particle Hydrodynamics</i>)

1 SISSEJUHATUS

Laevade ja merekonstruktsioonide projekteerimine talvise jäätumisega piirkondadesse on kasvav valdkond. Osalt saab seda põhjendada kliima soojenemisest tuleneva kasvava majandustegevusega arktilises kliimavööndis, teisalt kasvava vajadusega taastuvenergia järele, mis hõlmab muuhulgas Läänemere rajatud tuulegeneraatoreid. Sellest tulenevalt on tõusnud vajadus insenerlahenduste järele, mille osaks on jää ja konstruktsiooni vastasmõjuga arvestamine. Selliste lahenduste projekteerimisel on oluline koht jääolude simuleerimisel kolmemõõtmeliste mudelitega, mis võimaldavad efektiivselt vaadelda konstruktsioonile mõjuvaid jõude ning toetavad arendustegevust efektiivsemate ja ökonoomsemate lahenduste suunal.

Seoses kasvava arvutusvõimsusega on võimalik luua üha detailsemaid simulatsioone kehade vastastikusest mõjust ning viia tulemused täpsemini kooskõlla looduslike tingimuste ning eksperimentaalsete andmetega. Jää spetsiifika sisaldab paljusid mõjutegureid ja selle uurimine on arvutuslikult nõudlik protsess, mis jätkuvalt täiustub. Lõplike elementide meetodil põhinev analüüs on üks levinumaid viise kõnealuste simulatsioonide teostamiseks. Kuna konstruktsiooni analüüsis kasutusel olevad makrotasandi mudelid on suured ja arvutusmahukad, vajab nende arendamine ja analüüsimine eraldi tähelepanu ja teatavaid kohandusi.

Varasemalt on läbi viidud mitmeid analüüse jää ja konstruktsiooni vastasmõjust. Rosenthal (2012) katsetas LS-DYNA tarkvaral põhinevat jääplaadi ja koonus-konstruktsiooni mudelit, olles eelnevalt testinud erinevaid geomeetrilisi parameetreid (sh jääplaadi mõõtmed, koonuse kaldenurk) ning tuletanud sobivad minimaalsed mõõtmed adekvaatse tulemuse saamiseks, kasutades kuueta hulisi elemente. Jeon & Kim (2022) lõi mudeli Abaqus keskkonnas, kus kasutati alt kitsenevat koonust ning viieta hulistest elementidest koosnevat jääplaati. Jää materjali defineerimisel toetuti Kujala jt eksperimentaalsetele andmetele katsetest Balti mere jääga, samuti Lubbad & Løset (2011) katsebaseeni andmetele. Jää vastasmõju koonusega on uurinud ka Shi jt (2018) ning Tabri, Kõrgesaar jt (2022). Sellele lisanduvad erinevad teised katsed jää ja konstruktsiooni mudelitega nagu Xu jt (2019) ning Soa (2011). Kõigis neis allikates on teatavad parameetrised erinevused, samuti on jää näol tegu suuresti varieeruva ning komplitseeritud materjaliga, mille modelleerimine vajab jätkuvalt täiustamist ning uuringuid, seda eriti survest tingitud purunemise spetsiifika.

Käesolevas töös uuritakse lõplike elementide meetodil põhineva jää ja konstruktsiooni vastasmõju mudeli tööd erinevate sisendparameetrite korral ning analüüsitakse vastavate parameetrite mõju simulatsiooni tulemusele.

Töö esimeses pooles käsitletakse kasutatud metoodikat, olemasolevaid allikaid, jää materjaliomadusi ja selle purunemise spetsiifikat teoreetilises võtmes. Lahti seletatakse jää deformatsiooni ja purunemise protsessi erinevate aspektide sisu ja nende defineerimine mudelis. Kirjeldatakse kõnealusel teorial põhineva jää materjali valideerimist eksperimentaalse katse simuleerimisega ning tulemuste kõrvutamisega.

Töö praktilises osas luuakse jää ja konstruktsiooni vastasmõju mudeli algkontseptsioon ning selgitatakse välja sobivad sisendparameetrid, mida kontrollitakse katse abil. Abaqus tarkvara kasutades modelleeritakse katsekehad ning defineeritakse vajalikud materjaliomadused, piirtingimused, koormused, kehade kontakttingimused ning uuritavad parameetrid. Järgnevalt viiakse läbi rida simulatsioone erinevate parameetritega ning uuritakse konstruktsiooni kaldenurga, elemendi suuruse, läbistussügavuse (ingl k *overclosure*) ja elementide asetuse mõju katsetulemustele. Tulemused võetakse kokku viimases peatükis koos järelduste ja soovitustega edasiseks tööks.

2 METOODIKA JA LÄHTEKOHAD

2.1 Töö tagamaad

Jää ja konstruktsiooni vastasmõju arvestamine on oluline osa ranniku- ja avamerekonstruktsioonide projekteerimisel külmematesse kliimavöönditesse (sh Läänemere regioon), kus esineb talvist jäätumist. Jäänähtuste täpsem simuleerimine konstruktsioonide suhtes aitab kaasa ökonoomsemate rajatiste projekteerimisele, millel esineb vähem jääst põhjustatud kahjustusi.

Eelmisel ja käesoleval kümnendil on teema muutunud aktuaalsemaks seoses kasvava vajadusega taastuenergia järele, mille oluline komponent on meretuulepargid. Kõnealuste tuuleparkide rajamine sisaldab endas ka piirkondi, kus esineb igaaastast jäätumist. Eestis on kolm suuremat ala, kuhu plaanitakse meretuuleparkide rajamist: üks Liivi lahes ja kaks Saaremaast läänes (Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon, <https://tuuleenergia.ee/arendusprojektid/>, 2023).

Põhja-Jäämeres asub hinnanguliselt 22% kogu maailma nafta- ja gaasivarudest (Budzik, 2009), samuti on kliima soojenemise tagajärjel pikenenud arktiliste laevateede navigatsiooniperiood ning muutunud võimalikuks uute kasutamine. See on toonud kaasa kasvava vajaduse uute laevade ja avamereplatvormide projekteerimiseks kõnealuse piirkonna tingimustesse. Kõike seda arvestades on kasvanud arktiliste insenerlahenduste tähtsus.

Kõnealustes insenerlahendustes on tähtis koht merejääga kokkupõrkel konstruktsioonile mõjuvate jõudude arvestamisel ja ennustamisel. Selleks otstarbeks on kasutatud erinevaid meetodeid, sh numbrilised, analüütilised ja eksperimentaalsed. Viimaste puhul viiakse läbi katsed füüsiliste kehadega, näiteks katsebasseinis või ehitusobjektidel kohapeal. Kuigi tegu on kõige usaldusväärsema meetodiga, ei ole see tihti praktiline oma töömahukuse tõttu. Katsebassein jällegi seab piirangud kehade mõõtmetele. Kasutades numbrilisi ja analüütilisi meetodeid on võimalik vältida paljusid probleeme, mis kaasnevad eksperimentaalsete uuringutega.

2.2 Metoodika

2.2.1 Numbriline meetod

Numbriline meetod on pälvinud laialdast kasutust, kuna sellega on võimalik kehade vastasmõju täpsemalt simuleerida. Täpsete tulemuste saamiseks simuleeritakse nii painde kui surve mõjul purunemist.

Kasutusel olevad numbrilise meetodi tüübid jää ja konstruktsiooni vastasmõju uurimisel:

- lõplike elementide meetod (LEM), *finite element method (FEM)*
- diskreetsete elementide meetod (DEM), *discrete element method (DEM)*
- silutud osakeste hüdrodünaamika (SPH), *smoothed-particle hydrodynamics (SPH)*
- liikuvate osakeste pooleksplitsiitne (MPS), *moving particle semi-explicit (MPS)*

2.2.2 Lõplike elementide meetod

Üks praktilisemaid viise jää ja konstruktsiooni vastasmõju kolmemõõtmeliseks simuleerimiseks on lõplike elementide meetod, LEM (ingl k. *finite element method*, FEM).

Lõplike elementide meetod on arvutusmehaanika meetod. Arvutusmehaanika tegeleb mehaanika rakendusülesannete numbrilise lahendamise arvuti abil. Ta hõlmab probleemikompleksi, mis on seotud arvutusmatemaatikaga ja arvuti kasutamisega. ("Lõplike elementide meetod", Andres Lahe 2008).

Lõplike elementide meetod ehk LEM on numbriline arvutusmeetod insener-tehniliste ja füüsikaliste probleemide lahendamiseks. Meetod hõlmab üldiste (osatuletistega) diferentsiaalvõrrandite ja/või nende süsteemi aproksimeerimist ehk lähendamist üle mingi (pideva) piirkonna (nt tasand), mis jaotatakse väiksemateks, lõplikeks elementideks (nn piirkonna diskreetimine). Numbriline lahend kogu piirkonna jaoks saadakse lõplike elementide summeerimisega mingi eeskirja järgi. ("Lõplike elementide meetod", https://et.wikipedia.org/wiki/lõplike_elementide_meetod, 2023).

Praktikas tähendab see kehade modelleerimist ning nende jaotamist hulktahukatest elementidest koosnevaks võreks (*mesh*), milles elemendid on seotud omavahel xyz koordinaatsüsteemis määratud sõlmedega (*nodes*).

Lõplike elementide meetod on kasutuses kehade (sh laevade jt merekonstruktsioonide) kokkupõrgete uurimiseks ning võimaldab simuleerida materjalidele mõjuvate jõudude poolt põhjustatud painet, deformatsiooni ja purunemist, ning vaadelda kõnealuste jõudude mastaapi ja ulatust keha sees. Kuna tegu on komplekssete mudelitega, võivad parameetrid kohati erineda tegelikkusest ning töö nende täiustamise suunas on vajalik.

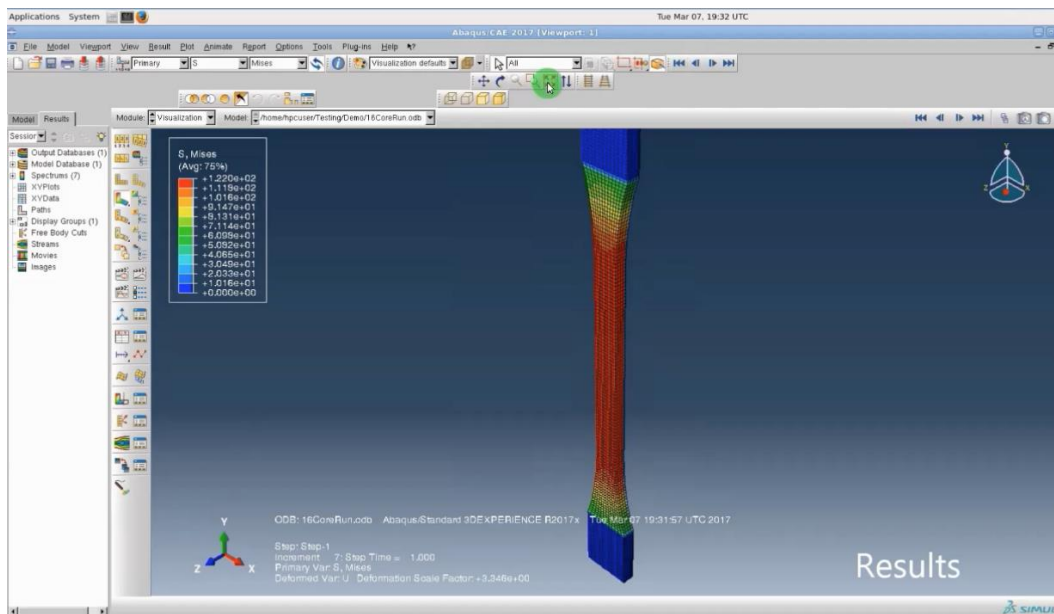
2.2.3 Tarkvara

Käesoleva töö teostamisel on kasutatud Abaqus FEA lõplike elementide meetodi tarkvara MS Windows operatsioonisüsteemis. Tegu on CAD tarkvaraga, mis on kasutuses teadustöös, ning paljude tööstusharude tootearenduses sh autondus, lennundus ja merendus. Tarkvara võimaldab simuleerida suuremahulisi mudeleid ning mittelineaarsust, omades mugavat ja kiirelt õpitavat kasutajaliidest.

Abaqus tarkvara koosneb järgmistest põhikomponentidest:

- Abaqus CAE
- Abaqus Standard
- Abaqus Explicit
- Abaqus CFD
- Abaqus Electromagnetic

(<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>)



Joonis 2.1 Näide tõmbeteimi simulatsioonist Abaqus keskkonnas (www.pinterest.com)

Abaqus kasutab avatud lähtekoodiga programmeerimiskeelt Python skriptimiseks ja kohandusteks. Python võimaldab mitut programmeerimisstiili, näiteks objektorienteeritud, protseduraalset või funktsionaalset programmeerimist. Pythonit

peetakse üsna lihtsaks keeleks ja just sellest on soovitatud programmeerimise õppimisel alustada. Python sisaldab selliste programmeerimiskeelte nagu C++, Java, Modula-3 ja Scheme tunnuseid. ("Python (programmeerimiskeel)", [https://et.wikipedia.org/wiki/Python_\(programmeerimiskeel\)](https://et.wikipedia.org/wiki/Python_(programmeerimiskeel))), 2023)

2.3 Töö eesmärk

Käesolevas töös luuakse mudel, et uurida erinevate sisendparameetrite mõju jää purunemise protsessile. Viiakse läbi simulatsioonid liikuva jää kokkupõrkest jäiga konstruktsiooniga. Vaatluse all on jää purunemise kujunemine, iseloom ja protsessi käigus tekkivad jõud, ning kuidas sisendparameetrite muutmine neid mõjutab. Seejuures on mudeli loomisel ja rakendamisel eesmärk saavutada parameetrite võimalikult lähedane vastavus eksperimentaalsetele mõõtmistele.

2.3.1 Lähteallikad

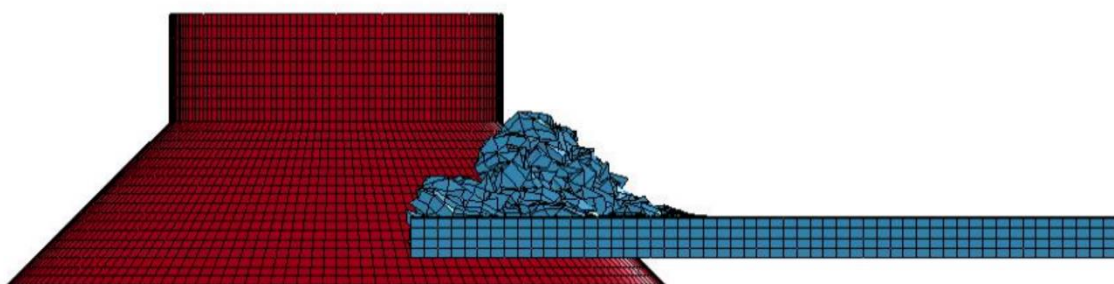
Kuigi töös kasutatud allikate loetelu on esitatud selle lõpus, on järgnevalt välja toodud olulisemad allikad, millele metoodika ja parameetrite valikul on toetunud, koos nende sisu lühikirjeldustega, kronoloogilises järjekorras.

Antud töö uurimisobjekti ja selle parameetrite valikul on aluseks võetud Rando Rosenthali 2012 tehnikateaduste magistri diplomitöö "Jääkoormuse arvutamine koonusekujulise tuulegeneraatori vundamendile numbrilise meetodiga", kus on kasutatud lõplike elementide meetodil põhinevat LS-DYNA tarkvara.

Koonuskonstruktsiooni on käsitletud kui jäika eeldusel, et selle jäikus on tunduvalt kõrgem jääst ja deformatsioon võrreldes jääga on tühine. Konstruktsiooni mõõdud vastavad tuulegeneraatorile võimsusega vahemikus 2-5 MW. (Tabri, Tõns, Suominen, & Kõrgesaar, 2022)

Simulatsioonid näitasid, et koormused koonuskonstruktsioonile stabiliseeruvad, kui jää pikkus on vähemalt 55 paksust. See katse viidi läbi jäätalaga (laius 1 element) ning kaldseinaga. Katsetati ka erineva laiusega plaati pikkusega 45 m ja paksusega 0,6 m ning optimaalseks laiuseks leiti 75 m. Selliste parameetritega jääplaat on piisav adekvaatsete parameetrite saamiseks ning mõistlik oma eeldustelt arvutusmahu osas. (Rosenthal, 2012)

Magistritöös arvatati koonusekujulisele mereehitisele mõjuvat jõudu võttes arvesse keskmist jää paksust Läänemeres, jää kiirust ning koonuse erinevaid kaldenurki. Numbriliselt arvatatud kontaktjõude võrreldi analüütiliste meetoditega, mis on soovitatud klassifikatsiooniühingute poolt. Numbrilised simulatsioonid näitasid madalamaid maksimaalseid jää koormusi võrreldes analüütiliste mudelitega. Arvutusmeetodite erinevus kasvas koos koonuse kaldenurga tõusuga. Samas, võttes arvesse võimalikke mittelineaarseid komponente, mida ei arvestata analüütilistes valemites, olid väiksemad koormused eeldatavad. Seevastu numbrilised arvutused näitasid, et jää kiirus omab mõju jää koormusele. Numbriliselt saadud jää koormused ületavad analüütiliste mudelitega saadud koormusi, kui jää kiirus oli suurem kui 0.3 m/s. (Rosenthal, 2012)



Joonis 2.2 Näide jää ja konstruktsiooni vastasmõju simuleerimisest LS-DYNA tarkvaraga (Rosenthal, 2012)

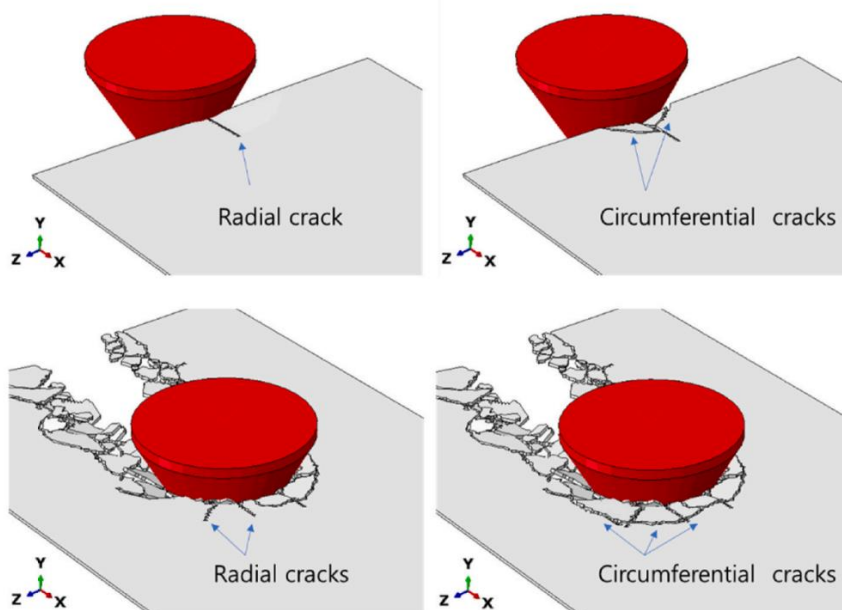
Teine põhiallikas on autorite Sangkyu Jeon ja Yooil Kim 2021 aasta töö "Numerical simulation of level ice-structure interaction using damage-based erosion model" (Ocean Engineering). Kõnealuses töös on kasutatud Abaqus tarkvara ning selles loodud mudeli teoreetilisel ülesehitusel põhinev edasine analüüs on ka käesoleva töö eesmärk.

Töös modelleeriti jää purunemist elementide kustutamise kindla purunemiskriteeriumi saavutamisel, et uurida jää ja koonuskonstruktsiooni vastasmõju. Kõnealust elementide kustutamist nimetatakse edaspidi elementide erosiooniks. Jää materjali modelleerimisel kombineeriti Drucker-Prageri plastsus ning erosiooni mudel, et modelleerida jää purunemise protsessi. Elementide suuruse tõttu tähendab nende kustutamine aga seda, et kontakt jää ja konstruktsiooni vahel ajutiselt kaob, mis põhjustab kontaktjõududes katkendlikkust. Samuti ei saa antud metoodika abil modelleerida tekkivat paindeolukorda. Sellest tulenevalt täiendati mudelit progresseruva purunemise kahjuindeksiga (*damage index*), mis tähendab, et purunemiskriteeriumi saavutamisel materjal nõrgeneb järk-järgult. Lisaks aktiveeriti mudelis hüdrostaatiline rõhk ja hõõrdejõud. Survepurunemise simuleerimiseks kasutati rõhu-läbistuse suhet. Kirjeldatud terminoloogiast on antud põhjalikum ülevaade koos

selgitustega töö teoreetiliselt osas. Jää materjali defineerimisel toetuti Kujala jt eksperimentaalsetele andmetele katsetest Balti mere jääga, samuti Lubbad & Løset (2011) katsebaseini andmetele.

Mudeli valideerimiseks viidi läbi nelja punkti katse simulatsioon, mille tulemusi võrreldi sama katse eksperimentaalsete tulemustega. Tulemused ühtisid ning autorid tõestasid oma mudeli õigsust. Järgnevalt loodi mudel jääplaadi ja koonuskonstruksiooni vastasmõju uurimiseks, milles allasuunas kitsenevat koonuskonstruksiooni liigutati läbi jääplaadi erinevatel kiirustel. Vaatluse all oli koonuskonstruksioonile mõjuv koormus, mida võrreldi mudelkatsetega. Mudel jäljendas edukalt radiaal- ja ringpragude teket ning koormused kasvasid koos kiirusega. Vaadeldi ka kiiruse mõju purunemisele ja jäätükkide tekkele. Koormuste seost kiirusega uuriti kasutades kaht erinevat Rayleigh'i sumbuvustegurit, ning saadud lineaarseid graafikuid võrreldi eksperimentaalsete andmetega. Andmed ühtisid suuremas osas, kuigi mõningad erisused võisid autorite hinnangul olla põhjustatud jäätükkide roteerumise komplekssest hüdrodünaamikast, mida antud lihtsustatud mudel ei olnud suuteline täielikult jäljendama.

Antud juhul on vajadus välja selgitada millal autorite presenteeritud jää mudel töötab ja millal mitte. Probleem selle juures seisneb tulemuste lahkneemisest tegelikkusest surve tingimustes, kuigi paindel töötab mudel hästi. Kõnealusel töös presenteeritud materjal on võetud aluseks ka käesoleva töö ülesehitusel ning eesmärk on edasi vaadelda millal domineerivad jää ja keha vastasmõjus surve- ja millal paindejõud. Selleks viiakse läbi korduvad katsed kehadega, muutes nende erinevaid parameetreid.

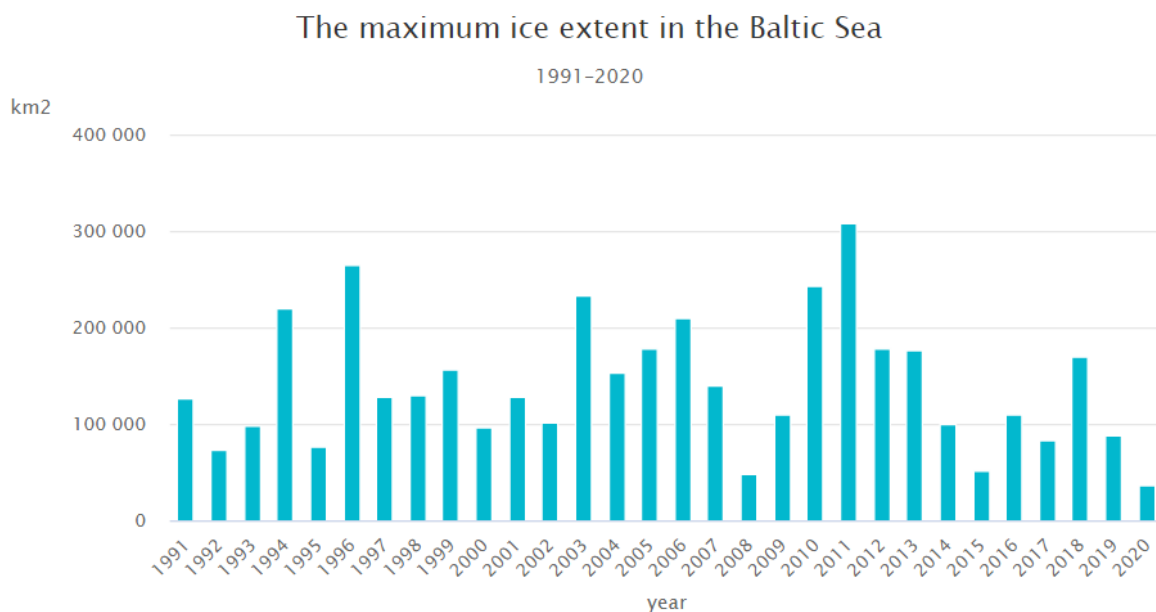


Joonis 2.3 Näide jää ja konstruksiooni vastasmõju simuleerimisest Abaqus keskkonnas (Jeon & Kim, 2021)

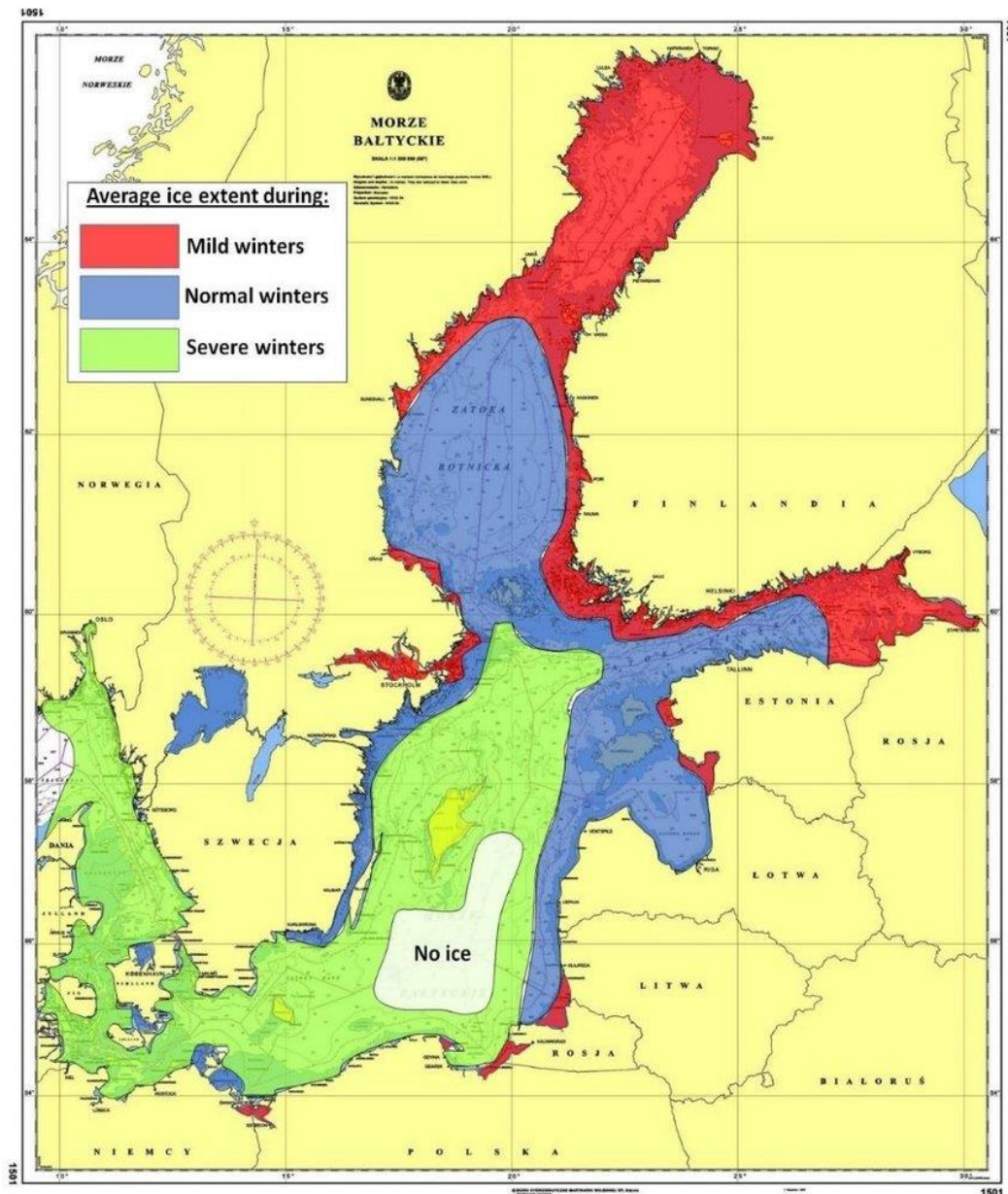
Jää vastasmõju koonusega on uurinud ka Shi jt (2018) ning Tabri, Kõrgesaar jt (2022). Sellele lisanduvad erinevad teised katsed jää ja konstruktsiooni mudelitega, nagu Soa (2011) katsetused LS-DYNA koodil põhinevate jää materjali mudelitega ning Xu jt (2019) katsed jää materjali ja keraja konstruktsiooni vastasmõjuga. Viimased küll kattuvad osaliselt käesoleva töö teemaga, kuid on oma suunitluselt ja meetodikalt oluliselt erinevad. Kõigis neis allikates on teatavad parameetrised erinevused, samuti on jää näol tegu suuresti varieeruva ning komplitseeritud materjaliga, mille modelleerimine vajab jätkuvalt arendust ning uuringuid, seda eriti survest tingitud purunemise spetsiifika.

2.4 Balti mere jää spetsiifika

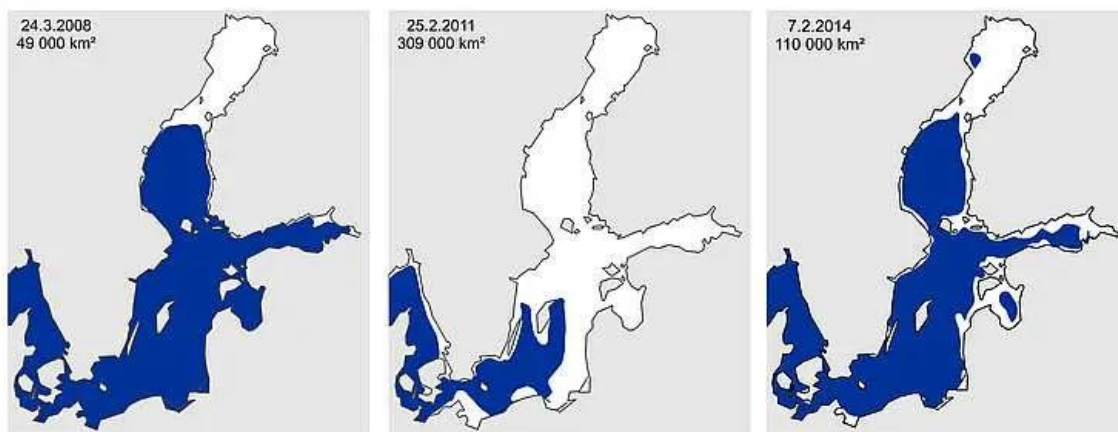
Balti mere jäätumine on igaaastane nähtus, mille ulatus sõltub konkreetse talve ilmastikust. Igal talvel tekib Põhjjalahe põhja- ja Soome lahe idaosas, sealhulgas Narva lahes ning Eesti lääneranniku lahtedes jää. Mere lõunaosas juhtub see vaid kolmandikul talvedest. Talve karmust kajastav jääpäevade arv on Põhjjalahe põhjaosas ligikaudu 190, kõige karmimatel talvedel kuni 240 päeva ehk umbes kaheksa kuud (Mardiste, Kuidas Läänemeres tekib ja kaob jää, 1997). Joonisel 2.4 on avaldatud jää maksimaalne levik ruutkilomeetrites 30 aasta jooksul vahemikus 1991-2020. Näha on maksimumide vähenemist viimasel kümnendil, kuid külmemal talve esinemise tõenäosust ei saa pidada olematuks. Joonistel 2.5 ja 2.6 on näidatud jää maksimaalne levik läänemeres tüüptalvede korral ning näited konkreetsetest aastatest vastavalt.



Joonis 2.4 Jää maksimaalne ulatus läänemeres ruutkilomeetrites 1991-2020 (Soome Meteoroloogiasinstituut, <https://en.ilmatiiteenlaitos.fi/icestatistics>)



Joonis 2.5 Keskmise jää suurim levik Läänemerele tüüptalvede korral (Hydrographic Office of the Polish Navy)



Joonis 2.6 Jää suurim levik aastatel 2008, 2011 ja 2014 (Soome Meteoroloogainstituut)

2.4.1 Ida-Balti regioon

Kuigi erinevates dokumentides on Eesti rannikumere jääolude kohta andmeid juba 14-15. sajandist, kujunes täpsemate vaatluste teostamise praktika välja 19.saj teisel poolel. (Sooäär, 2006)

Eesti rannikuvetes tekib jää kõigepealt Pärnu lahes ja Väinamere idaosas, tavaliselt novembri lõpul ja detsembri algul. Mõnikord on esimene jää moodustunud juba oktoobri viimastel päevadel – nõnda oli 1956. ja 1960. aastal. Ent varasele jäätekkele ei tarvitse igakord järgneda külm ulatusliku merejäätmisega talv. Meie muutliku sügistalvise ilmastiku tõttu võib jää tekkida ja kaduda mitu korda, enne kui see püsima jääb. (Mardiste & Vahter, Vähima jääkattega talv Läänemerel, 2008/12)

Liivi lahel tekib merejää iga-aastaselt. Tavapärase jäätumisperiood on 3-5 kuud. Pehme talve korral toimub jäätumine ainult Pärnu lahes, keskmise ja karmi puhul jäätub terve Liivi laht. Keskmise jäätumiskuupäev on 10.dets ja murdumiskuupäev 27.apr. Kinnisjää keskmine periood on 15.jaan-9.apr. Jää keskmine paksus on 10-40 cm, maksimaalselt 105 cm. Soome lahe põhjarannikul algab jäätumine umbes 2 nädalat lõunarannikust varem ja lõppeb sama palju hiljem. (Jevrejeva & Leppäranta, 2002)

Keskmine paksus Eesti poolel on mõõdetud 42 cm, maksimaalne 88 cm standardhälbega 17 cm; Soome poolel keskmiselt 37 cm (max 85 cm) hälbega 5 cm. (Leppäranta & Seinä, 1985) Viimastel kümnenditel on vähenenud nii jääpäevade arv kui jää keskmine paksus, kuid kuna jää paksenemine on halva soojusjuhtivuse tõttu eksponentsiaalselt kahanev (Sooäär, 2006), toimub esimese mõnekümne sentimeetri saavutamise suhteliselt kiiresti ning kindlasti tuleb sellega arvestada ka tänapäevaste konstruktsioonide projekteerimisel Läänemere kliimasse.

Jää liikumise tavapärase kiirus jääb vahemikku 0-20 cm/s, tugevama tuulega kuni 40 cm/s. Harva on mõõdetud kiiruseks ka 60 cm/s. (Leppäranta, An ice drift model for the Baltic Sea, 1981); (Uotila, 2001)

3 TEOREETILINE TAUST

3.1 Jää purunemine kehaga kokkupõrkel

Jää purunemine kehaga kokkupõrkel toimub paljudel erinevatel viisidel. Määravateks teguriteks on siin jää paksus, tüüp, suhteline liikumise kiirus ja konstruktsiooni kuju. Jää puruneb nii surve-, painde- kui nihkejõudude toimel, muuhulgas pragunedes. Esmasel kokkupuutel konstruktsiooniga tekivad jääplaadis lokaalsed survejõu purustused. Pärast esmaseid purustusi hakkab jääle mõjuma vertikaalne jõud, mis hakkab jääplaati painutama veeliinist eemale. Paindejõu toimel tekivad jääplaadis kõigepealt radiaalsed ja seejärel ringjoonelised murdumised.

Merekonstruktsioonide projekteerimisel on jää kokkupõrketsoonis eelistatud kaldpindade kasutamine, mis avaldavad jääle suuremal määral paindejõudu. Paindejõu kasutamine jää purustamisel on praktiline, sest jää paindetugevus on oluliselt väiksem survetugevusest ning seetõttu on painde kasutamisel konstruktsioonile avalduv surve väiksem.



Joonis 3.1 Jää purustamine KV Svalbard vööri poolt (3. fotol on antud tagasikäik), (Lubbad & Løset, 2011)

Jää purunemise protsessi mastaapsus on painde puhul suur ning lõplike elementide meetod on seetõttu väga sobilik selle nähtuse vaatlemiseks. Survejõud seevastu põhjustab väiksemahulist järkjärguliselt kasvavat purunemist, mille käsitlemiseks on kasutusel survejõu-pindala seos. Lubatud on läbistussügavus (ingl k *overclosure*) kuni piirini, mille seab jää murdamine. Survepurunemise modelleerimisest ja terminitest põhjalikum selgitus on antud alapeatükis 3.5.

3.2 Jää plastsus

Jää struktuur on üsna ebatavaline: hapniku aatomid paiknevad korrapäraselt ning vesiniku omad ebakorrapäraselt. Seetõttu erineb jää käitumine materjalina tavapärasest kristallist. Jää materjaliomadused sõltuvad temperatuurist, soolsusest, poorsusest, sisepingetest ja kristallstruktuurist.

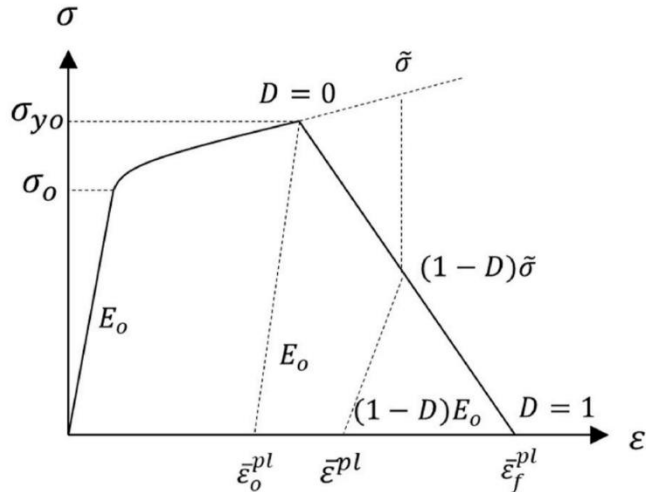
Jää käitub nii plastse kui rabeda materjalina. Pärast suhteliselt madala plastsuspiiri saavutamist ta kõvastub ning kõrgematel pingetel paindudes pehmeneb. Jää purunemise viis sõltub ka rõhutasemest, rõhu kasvades kasvab materjali tugevuspiir. (Schulson, Brittle failure of ice, 2001)

Eelkirjeldatu põhjal on otsustatud kasutada Drucker-Prager'i (DP) materjali mudelit jää käitumise kirjeldamiseks. Erinevalt von Mises modelist, mida kasutatakse tavapäraselt metallide puhul, sõltub materjali voolamine DP mudelis hüdrostaatilisest rõhust. Kõvastumine (ingl k *hardening*) pärast plastset painet on defineeritud kui seos materjalile mõjuva pinge ning materjali suhtelise deformatsiooni vahel. Paindele järgnev materjali haprus on saavutatud progressiivse purunemise (*damage mechanics*) mudeli abil. Viimane paneb materjali kiiresti vastupanuvõimet kaotama kahjuindeksi abil, mis lisati terve materjali DP mudelile.

3.3 Materjali progressiivne purunemine

Materjali deformeerumise käigus tekivad selles mikromõrad ja õõnsused, mistõttu materjali vastupanu pingele väheneb, kulmineerudes detaili purunemisega. Materjali progressiivse kahjustumise jäljendamiseks on vajalik defineerida kahjustumise algustingimused ning selle arengu põhimõtte, mis määrab materjali käitumise kahjustumise algusest kuni purunemiseni.

Kõnealune kahju arenemise protsess on kirjeldatud joonisel 3.2. Käesolevas mudelis on eeldatud, et kahjustumise protsess algab, kui materjali suhteline plastne deformatsioon $\bar{\epsilon}^{pl}$ jõuab piirini $\bar{\epsilon}_0^{pl}$, mis on protsessi algusdeformatsioon. Enne nimetatud punkti jõudmist kahjuindeks $D = 0$. Pinge kasvades kahju areneb koos plastse deformatsiooniga ning kahjuindeks kasvab. Nii tegelik pinge $\bar{\sigma}$ kui normaalelastsusmoodul vähenevad vastavalt D väärtusele. Kahju arengu lõpus jõuab suhteline plastne deformatsioon purunemisdeformatsioonini $\bar{\epsilon}_f^{pl}$, materjali vastupanuvõime kaob täielikult ning kahjuindeks $D = 1$.



Joonis 3.2 Jää kahjustumise algus ja areng
(Jeon & Kim, 2021)

Seos tõeliste ja näivate väärtuste vahel on järgnev:

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} = (1 - D)E_0$$

Kahjuindeksi defineerimiseks on erinevaid võimalusi. Antud juhul on see defineeritud energeetiliselt. Purunemisenergia G_f on siin defineeritud kui välise koormuse poolt tehtud töö kahju arengu protsessi jooksul, so. ala, mis jääb pinge ja suhtelise plastse painde graafiku alla. Kahju areneb proportsionaalselt plastse deformatsiooniga, nagu on defineeritud võrrandis: $\dot{D} = \frac{a\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}}$. a on siin proportsionaalsus-koefitsient. Purunemisenergia, mis vastab piirkonnale pinge ja suhtelise plastse painde graafiku all avaldub järgnevalt:

$$G_f = \int_{\bar{\epsilon}_0^{pl}}^{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \sigma d\bar{\epsilon}^{pl}$$

Purunemisenergia on võimalik avaldada kahte eelnevat võrrandit kombineerides:

$$G_f = \frac{\sigma_{y_0} \bar{\epsilon}_f^{pl}}{2}$$

σ_{y_0} on siin pinge punktis, kus kahjustumine algab. Kui kahjuindeks jõuab 1-ni, arvatakse vastav element analüüsist välja, mis simuleerib pragusid. (Jeon & Kim, 2021)

3.4 Materjali ujuvus ja hõõrdumine

Murduvad jäätükid liiguvad kaldpinda mööda vee alla ja neile mõjub ujuvuse suhtes vastupidine takistus. Allpool veeliini asuvatele jäätükkidele mõjuva hüdrostaatilise rõhu võrrand on järgnev:

$$p_s = \begin{cases} -\rho_w g y & y < 0 \\ 0 & y \geq 0 \end{cases}$$

ρ_w on siin vee tihedus, g on gravitatsioonikiirendus ja y on vertikaalne koordinaat, kus 0 on veeliin.

Pärast osade elementide erodeerumist on vaja olemasolevate elementide uutele tahkudele tekitada ujuvusjõud. Selleks on ujuvusjõud avaldatud elementide kõikidele tahkudele, kus vastupidised jõud tühistavad üksteist.

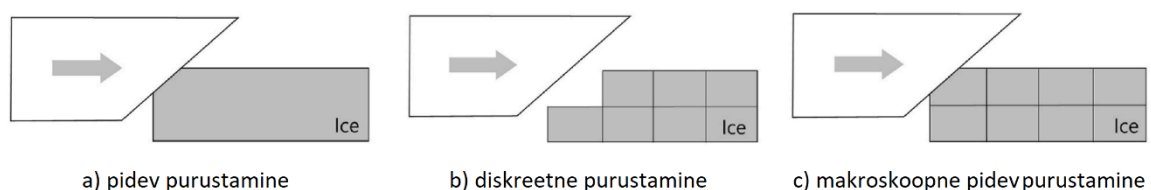
Pärast murdumist tekib jäätükkide ja ümbritseva vee vahel hõõrdejõud sõltuvalt suhtelisest kiirusest. Tekib jäätükkide pöördliikumine suurte kiirendustega tänu paindeenergia vabanemisele. Jäätükkide kiirendus mööda kaldpinda vee alla liikudes on samas väike. Põhiliselt mõjub vee all liikuvatele jäätükkidele viskoossusest põhjustatud takistusjõud. Jäätükkidele mõjuva takistuse määramiseks on antud mudelis kasutatud Rayleigh'i sumbuvuse mudelit. Seda defineeritakse järgnevas võrrandis massiga proportsionaalse sumbuvusena:

$$[M]\{\ddot{x}\} + \alpha[M]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\}$$

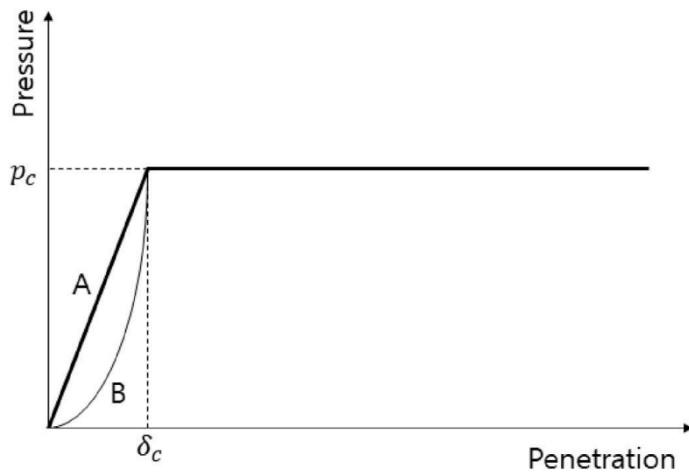
$[M]$ on siin massi- ja $[K]$ jäikusmaatriks, $\{x\}$ on sõlme nihkevektor, $\{f\}$ on välisjõu vektor ning α on Rayleigh'i sumbuvuskordaja. Viimane määratakse empiiriliselt, kuna vedeliku poolt avaldatud jõud jäätükkidele on Rayleigh'i mudelis idealiseeritud (Jeon & Kim, 2021).

3.5 Survest tingitud purunemine

Jää survepurunemine kehaga kokkupuutel algab väikesest kontaktpinnast ning selle simuleerimine makrotasandi analüüsis on komplitseeritud. Antud juhul on selleks kasutusel läbistamise lubamine kontaktkeha poolt jääplaadi sisse (Joonis 3.3, c).



Joonis 3.3 Erinevad survepurunemise modelleerimise meetodid (Jeon & Kim, 2021)



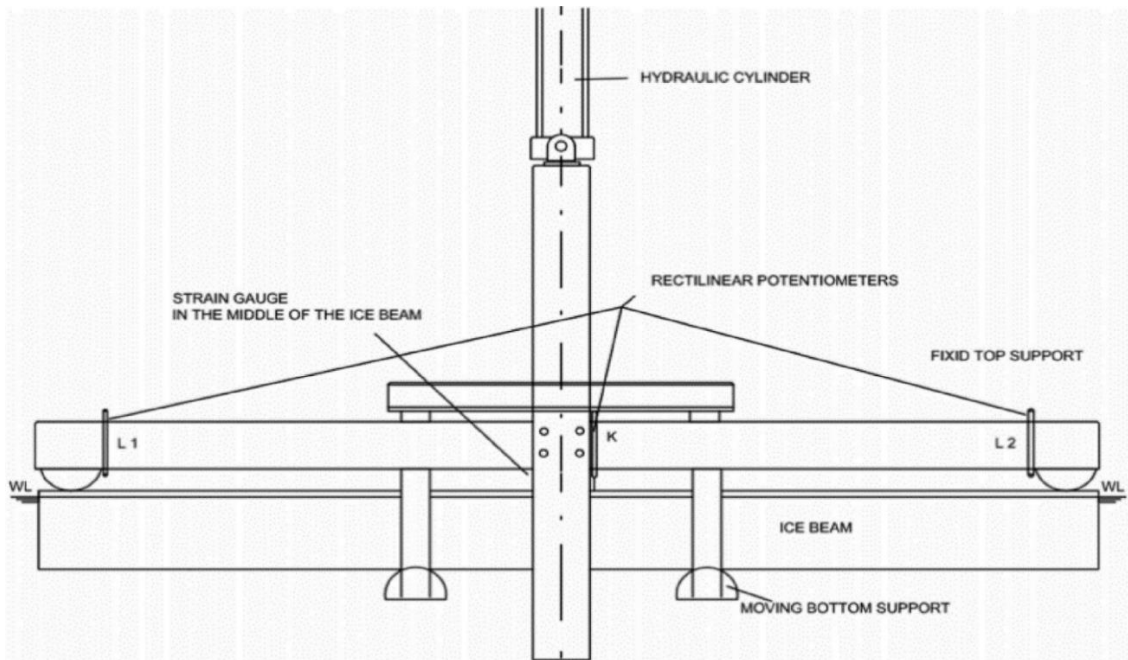
Joonis 3.4 Survepurunemise mudeli rõhu-läbistuse seos

(Jeon & Kim, 2021)

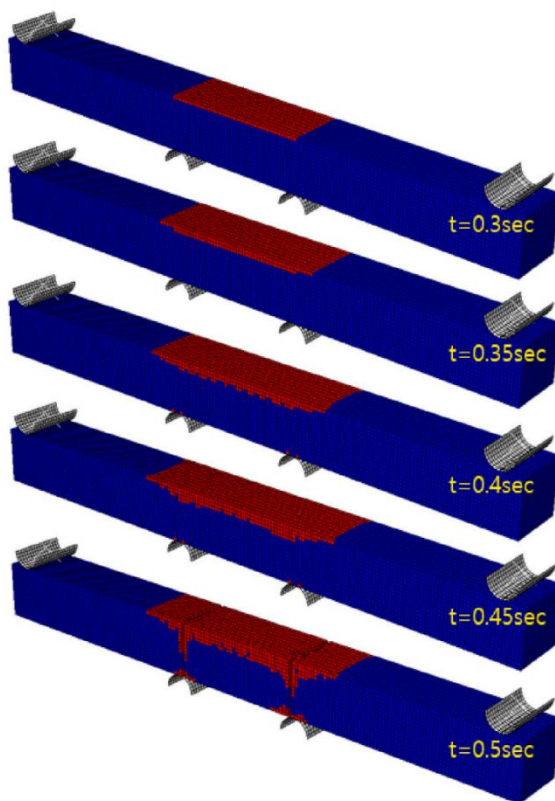
Jää survepurunemist saab makrotasandil defineerida kui surve ja läbistuse seost kahe kontaktpinna vahel, kus maksimaalse surve p_c määrab purunemistugevus ning kriitiliseks läbistuseks δ_c on määratud elemendi pikkus (vt joon. 3.4). Punkti (p_c, δ_c) suunas liikuvat seost saab modelleerida nii lineaarselt (A) kui eksponentsiaalselt (B). Kõnealust suhet saab defineerida nii empiirilisel kui eksperimentaalsel teel omandatud informatsioonile toetudes. Käesoleva mudeli juures on mindud eksponentsiaalse kasvu (B) teed. Nimetatud rõhu ja läbistuse seos ei ole osa üldtuntud mehaanikateooriast ning vajab edasist analüüsi, seda just eksperimentaalse kinnituse suunal. Kuna käesoleva töö juures on tegu potentsiaalselt olulise komponendiga, on see ka üks tähelepanu all olevatest aspektidest.

3.6 Nelja punkti katse

Käesolevas töös kasutatud numbrilise meetodi paikapidavus on varasemalt tõestatud Jeon'i ja Kim'i poolt, kes sooritasid selle kontrollimiseks nelja punkti paindekatse (joon. 3.6). Kõnealune katse põhineb omakorda P. Kujala, K. Riska ja P. Varsta 1990 aasta eksperimentaalsetel katsetustel Balti mere jääga (joon. 3.5).



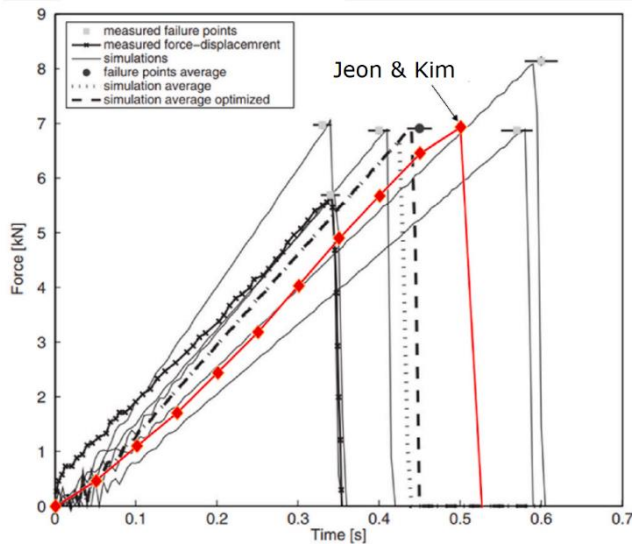
Joonis 3.5 Nelja punkti katse eksperimentaalne seadistus (Kujala, Riska, & Varsta, 1990)



Joonis 3.6 Materjali kahjustumise areng nelja punkti simulatsioonis (Jeon & Kim, 2021)

Katsekeha pikkus, laius ja kõrgus on vastavalt 4,325 m, 0,4 m ja 0,4 m ning kasutatud on kuuelemente küljepikkusega 0,04 m. Toed on defineeritud jäikade pindadena ning elementide arv on ligikaudu 30 000. Alumistele tugedele on kehtestatud liikumiskiirus 0.00275 m/s.

Joonisel 3.6 on näha katse käik. Materjali kahjustumine algab hüdrostaatilise rõhu mõjul katsekeha pealmise osa keskelt ning levib allapoole, kuni kahjuindeks jõuab 1-ni, misjärel toimub purunemine. Materjal puruneb üheaegselt kahes punktis kuna tegu on täielikult sümmeetrilise mudeliga.



Joonis 3.7 Jää vastupanu muutus ajas, simulatsiooni võrdlus eksperimentaalsete andmetega (Ehlers & Kujala, 2014)

Joonisel 3.7 on võrreldud simulatsiooni tulemusi Ehlers'i ja Kujala 2013 aasta töös avaldatud eksperimentaalsete andmetega. Katsed näitavad koormuse lineaarset kasvu kuni punktini, kus hakkavad kiirelt arenema praod. See on tüüpiline hapra materjali tunnus. Simulatsiooni tulemused langevad kokku eksperimentaalsete andmetega ning mudelit saab pidada korrektseks.

4 TÖÖÜLESANDE PÜSTITUS JA MUDELI LOOMINE

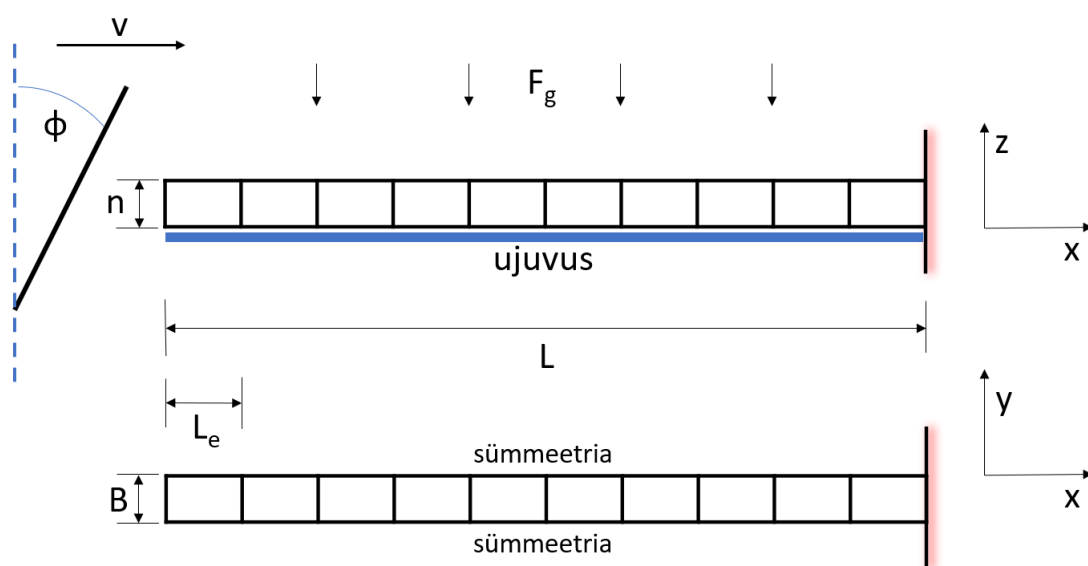
Tööülesande eesmärk on erinevate parameetrite mõju uurimine jää käitumisele kokkupõrkel jäiga konstruktsiooniga. Ülesande käigus luuakse tarkvara Abaqus keskkonnas mudel ning testitakse seda korduvates simulatsioonides lihtsustatud kehadega, muutes nende erinevaid parameetreid. Vaatluse all on parameetrite nagu elemendi suurus, asetus, seinakaldenurk ja läbistussügavus (overclosure) mõju katsetulemustele võrreldes kontaktist põhjustatud jõudude arengut ning jää purunemise protsessi makrotasandil.

4.1 Katsekehad

Lihtsuse ja arvutusmahu seisukohast on lähteallikates kirjeldatud jääplaat taandatud talale laiusega 1 element ning koonuskonstruktsioon kaldenurgaga jäigale tasapinnale. See loob eeldused viia läbi rohkem simulatsioone ning lihtsustab erinevate parameetrite muutmist ja nende mõju uurimist.

Katsekehana kasutatakse jäätala pikkusega L ning laiusega B . Laius B on ühtlasi ka ühe elemendi laius, st jäätala on 1 elemendi laiune. Tala liikumine on tagumisest otsast tõkestatud liikumispiiranguga ning mõlemale küljele on lisatud sümmeetriatingimus.

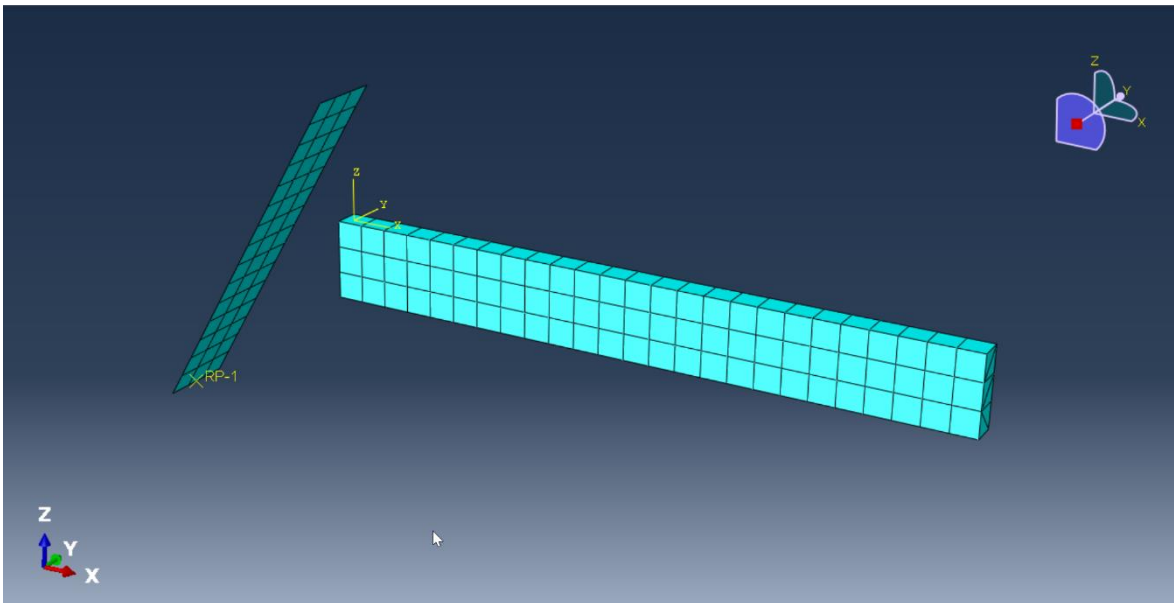
Kokkupõrge luuakse liigutades kiirusel v tala suunas (x -telje suund) jääka kaldpinda nurgaga φ vertikaaltelje (z) suhtes.



Joonis 4.1 Mudeli algkontseptsioon

4.2 Katsekehade modelleerimine

Simulatsiooni tarbeks modelleeritakse programmi Abaqus keskkonnas koost talast (risttahukas) ja tasapinnast (ristkülik). Kehad on modelleeritud xy-tasapinnal vastavalt ristkülikust ning lõigust ekstrudeerimise teel, seejärel roteeritud mööda x-telge nii, et z-telg näitab üles.



Joonis 4.2 Esialgne elementideks jaotatud mudel Abaqus keskkonnas

4.2.1 Jäätala

Jäätala on modelleeritud kui deformeeritav tahke keha (*deformable solid*). Tala algpikkuseks on valitud 45 m, paksuseks 0,6 m ning laiuks 0,2 m, mis on ühtlasi elemendi laius. Pikkuse ja paksuse valikul on lähtutud Rosenthali (2012) katsest, kus minimaalse paksuse-pikkuse suhtena tuvastati 55. Töös mindi edasi pikkusega 45 m ja paksusega 0,6 m, mis on ka käesoleva töö sisendparameetrid.

Tala on paigutatud xyz koordinaatsüsteemis vastavalt nii, et xy-tasapind oleks võrdne veeliiniga ning z-telg suunaga üles. Selleks on jäätala paksus H korrutatud taandatud tihedusega $0,900 \text{ kg/dm}^3$, saadud veealuse osa kõrgus, ning liigutatud tala selle võrra xy tasapinnast allapoole (-z suunal).

Tala tagumine ots on tõkestatud liikumispiiranguga x-suunal, mida eelistati muu liikumispiirangu loomisele, arvestades tala pikkust ning tasapinnaga lõikuval suunal mõjuvate jõudude teket. Tala mõlematele külgtasapindadele on kehtestatud sümmeetriatingimus, et tala käitüks sarnaselt plaadiga.

4.2.2 Kaldsein

Kaldsein on modelleeritud kui diskreetne jäik tasapind (*discrete rigid shell*), mis on ekstrudeeritud sirgest. Kuna mistahes merekonstruktsioon ületab oma tugevuselt oluliselt jääd ning selle deformatsioon jääga kokkupuutel on kaduvväike (mis ei ole ka selle töö uurimisobjekt), on tasapind käesolevas töös defineeritud jäigana. Sein on riskülik pikkusega 5 m ja laiusega 0,6 m, mis on kaldu z-teljega nurga φ all. Kaldenurga φ algväärtus on 30° ning see on üks muutujatest.

4.3 Sisendparameetrid

4.3.1 Materjali omadused

Jää materjalile antud parameetrid on esitatud tabelis 4.1. Parameetrid põhinevad Jeon & Kim (2021) poolt sooritatud nelja punkti katse sisendparameetritel. Need on osaliselt saadud Zhang jt (2017) artiklist "Updated Smoothed Particle Hydrodynamics for Simulating Bending and Compression Failure Progress of Ice", Lubbad & Løset (2011) tööst "A numerical model for real-time simulation of ship-ice interaction", ning kohandatud Ehlers & Kujala (2014) graafikuid silmas pidades.

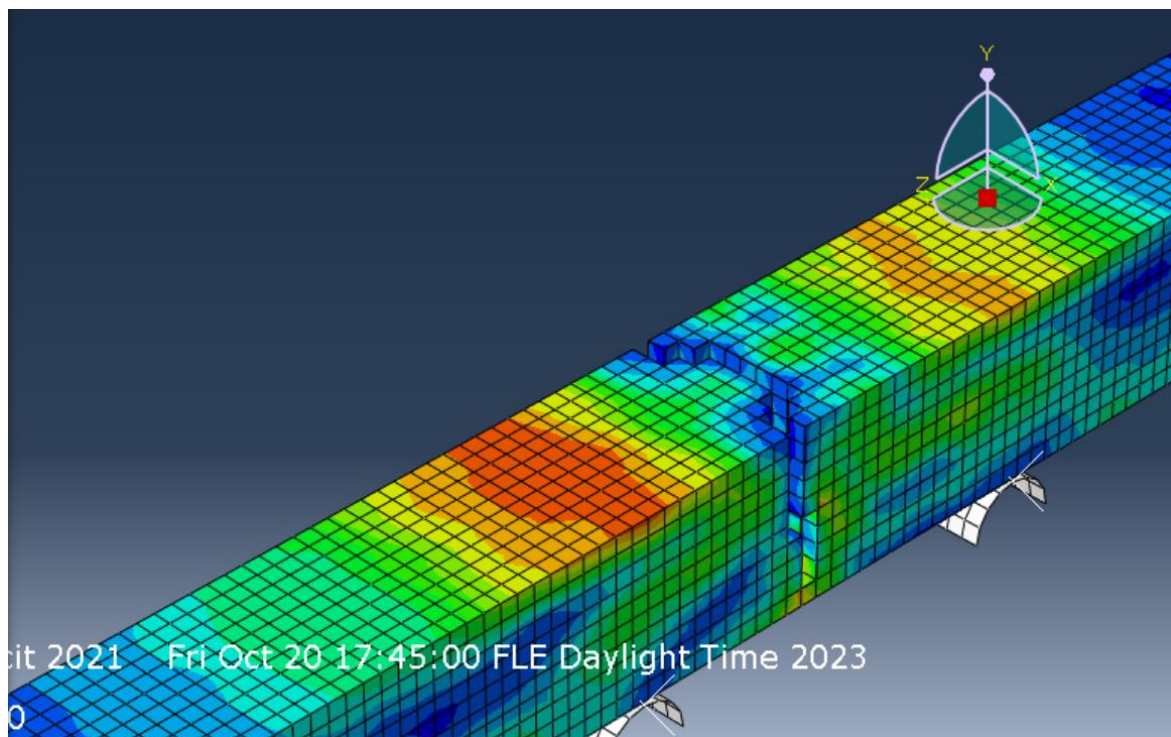
Tabel 4.1 Mudelis kasutatud jää omadused

Omadus	Väärtus	Ühik
Tihedus	900	kg/m ³
Paindetugevus	580	kPa
Survetugevus	1	MPa
Normaalelastsusmoodul	4,5	GPa
Poissoni tegur	0,3	-
Hõõrdenurk	36	-
Dilatsiooninurk	12	-
Kahjustumise algdeformatsioon	$1 \cdot 10^{-10}$	-
Purunemisenergia	7,5	J/m ²
Sumbuvustegur	3	1/s

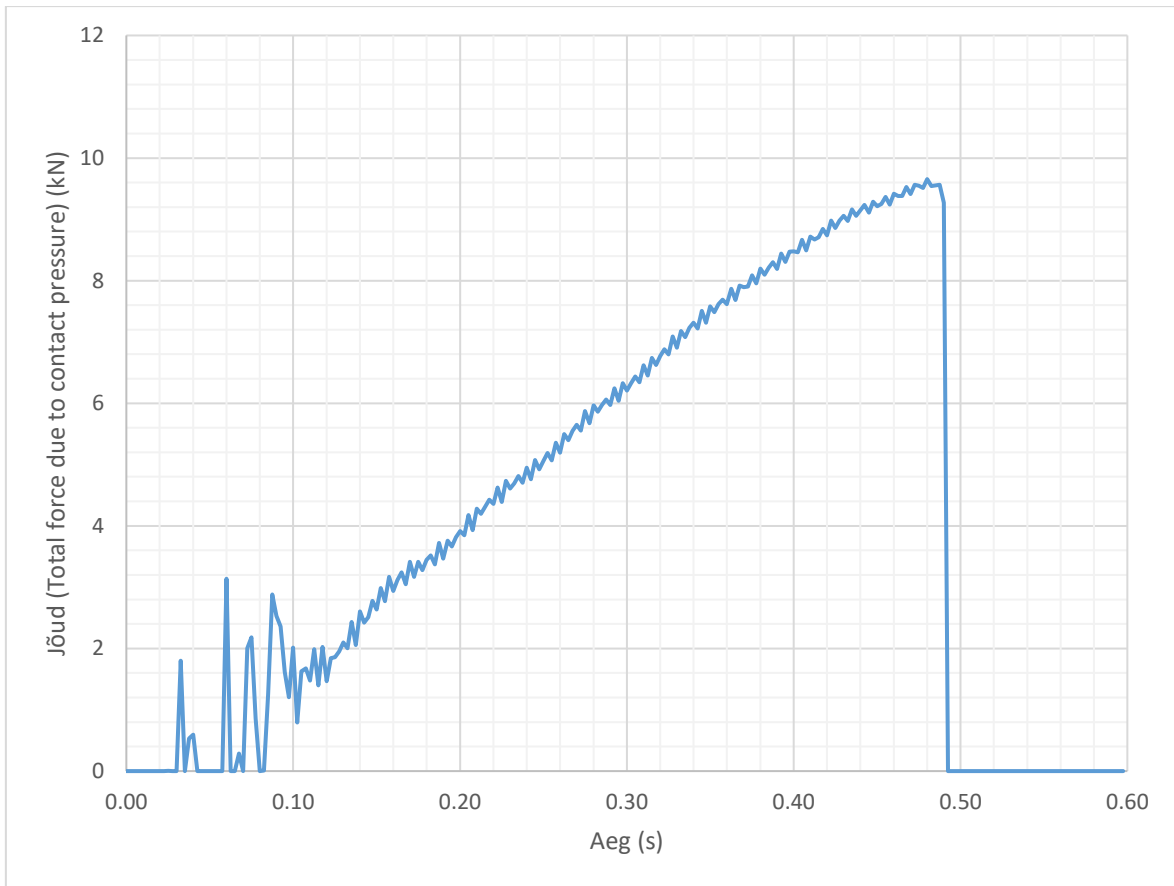
Abaquse mudelis luuakse materjal, mis seejärel seostatakse mudeli vastava sektsiooniga. Materjalile antakse omadused, mis iseloomustavad tema käitumist. Antud juhul on materjal jää ning sektsioon tala.

Jääle on määratud ühtne tihedus 900 kg/m^3 . Materjal on defineeritud elastse isotroopsena normaalelastsusmooduliga $4,5 \text{ GPa}$ ning Poissoni teguriga $0,3$. Kasutatud on Drucker-Prager'i plastsust hõõrdenurgaga 36° , voole-pinge suhtega 1 ning dilatsiooninurgaga 12° , millele on lisatud kõvastumine (*Drucker Prager Hardening*) paindel purunemispingega 580 kPa . Materjali kahjustumine on plastne algdeformatsiooniga $1 \cdot 10^{-10}$ ning lineaarse energeetilise evolutsiooniga, kus purunemisenergia on $7,5 \text{ J/m}^2$. Lisatud on sumbumine kordajaga 3 (Rosenthal, 2012).

Mudelis kasutatud jää materjali paikapidavust on kontrollitud peatükis 3.6 kirjeldatud nelja punkti katse kordamisega. Kasutades käesolevas peatükis esitatud materjaliomadusi ning parameetreid, viidi läbi katse simulatsioon Abaqus keskkonnas. Materjali purunemine toimus ootuspäraselt ja sarnaselt Jeon & Kim'i katsele, kuigi kahe võrdse murdekoha asemel tekkis üks keskne (Joonis 4.3). Samuti oli purunemise hetkel pinge mõnevõrra kõrgem kui Kujalal (Joonis 4.4), kuigi graafiku kuju vastas ootustele ja oli väga lähedane eksperimentaalsetele andmetele. Nimetatud erisuste täpsemaks uurimiseks oleks vaja kõrvutada katsemudelid ning veenduda nende identsuses. Põhjuseks võib pakkuda mudeli marginaalset hälvimist sümmeetriast või mõnda muud märkamata jäänud vähesema mõjuga tegurit. Kõike arvesse võttes järeldati, et antud parameetrid rahuldavad jää ja konstruktsiooni vastasmõju uurimise tingimusi.



Joonis 4.3 Jää purunemine nelja punkti katsel



Joonis 4.4 Kontaktjõu muutus ajas nelja punkti katsel

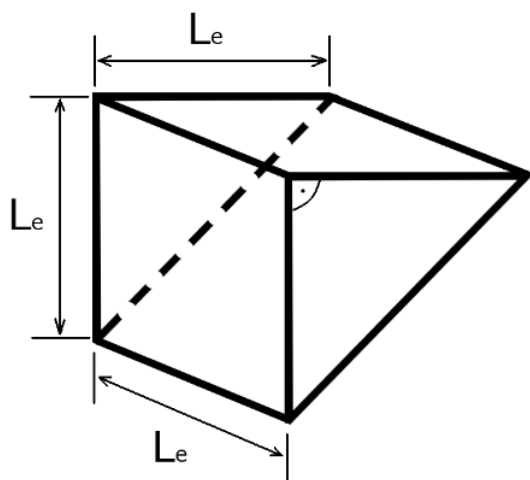
4.3.2 Geomeetrilised parameetrid

Katsemudeli geomeetrilised parameetrid on esitatud järgnevas tabelites (tabelid 4.2 ja 4.3). Tala pikkus, kõrgus ning kokkupõrke kiirus on valitud toetudes Rosenthali katsetele. Seina kaugus talast 0,9 m on sein ja tala lähimate punktide vaheline x-teljeline kaugus ning see otsustati hoida konstantsena kõigis katsetes. Arvestades kokkupõrke kiirust 0,3 m/s, annab nimetatud kaugus 3 sekundit aega katse algusest kokkupõrkeni. Katsetati ka teisi kaugusi nagu 0,1 m, 0,3 m ja 1,5 m ning leiti, et simulatsiooni alguses esinesid jää materjalis (arvatavasti gravitatsiooni ja ujuvuse koosmõjul) pinged, mis stabiliseerusid vahemikus 2-2,5 s alates simulatsiooni algusest. Nimetatud nähtuse mõju oli näha väiksemate kauguste (nagu 0,1 m) kasutamisel, kus materjalis tekkinud praod ja murdekohad paiknesid erinevalt. Suurematel kaugustel nimetatud erinevused kadusid ning sellest lähtuvalt otsustati kasutada kaugust 0,9 m ja seega ajavaru 3 s.

Tabel 4.2 Konstantsed geomeetrised parameetrid

Omadus	Tähis	Väärtus	Ühik
Tala pikkus	L	45	m
Tala kõrgus (jäa paksus)	H	0,6	m
Kokkupõrke kiirus	v	0,3	m/s
Seina kaugus talast	L_d	0,9	m
Tala laius	B	0,2	m
Elemendi kuju		kiil	

Katse käigus muudetakse mudeli erinevaid geomeetrisi parameetreid, et uurida nende mõju simulatsiooni tulemustele. Muudetavad geomeetrised parameetrid on avaldatud tabelis 4.3. Elemendi pikkuse esialgne mõõt põhineb Rosenthali katsetel ning sein kaldenurk on valitud tuginedes Jeoni parameetritel. Joonisel 4.5 on näha elemendi pikkuse avaldumine kiilukujulise (*wedge*) elemendi korral. Selline elemendi tüüp on eelistatud kuustahukale, sest suurendab simulatsiooni täpsust ning võimaldab paremini materjali pragunemist jäljendada.



Joonis 4.5 Elemendi pikkus kiilukujulises (*wedge*) elemendis

Tabel 4.3 Muudetavad geomeetrised parameetrid koos algväärtustega

Omadus	Tähis	Algväärtus	Ühik
Seina kaldenurk	φ	30	deg
Elementide arv jää paksuses	n	3	-
Elemendi pikkus	L_e	0,2	m
Läbistussügavus	L_{oc}	$1 * L_e$	m

4.4 Piirtingimused

Et mudel käituks simulatsioonis korrektselt, on detailidele koostus kehtestatud piirtingimused.

Seina puhul on oluline defineerida liikumise suund ja kiirus. Suuna defineerimiseks luuakse liikumise/rotatsiooni tingimus, kus antakse nullväärtus y ja z suunal liikumisele ning kõigil suundadel pööramisele. Sein saab seega liikuda vaid x-suunal. Kiiruse tarbeks luuakse eraldi kiirustingimus väärtusega 0,3 m/s x-suunal, mis on Rosenthali (2012) katsetes kasutatud keskmine kiirus.

Et simuleerida jää käitumist plaadina, tuleb talale kehtestada liikumispiirangud. Esiteks on jää mõlemale külgtahule kehtestatud sümmeetriatingimus mööda y-telge, mis jäljendab materjali jätkumist külgsuunaliselt (joonisel 4.2 vaataja poolne ja tagumine tasapind). Teiseks on vaja takistada jää tagasilikumist konstruktsiooni surve mõjul, mille tarbeks on jäätala tagumisele otsmisele tahule kehtestatud liikumise/rotatsiooni tingimus nullväärtusega x-suunal. y-suunal jäeti liikumine vabaks, kuna seda piirab sümmeetriatingimus. z-suunal liikumine jäeti vabaks: esialgu seda küll piirati, kuid pärast simulatsioonide sooritamist jõuti järeldusele, et see mõjutab katse tulemust mittesoovitud suunas ning põhjustab pingete koondumist. Et vältida momendist põhjustatud jõudude koondumist tagumise otsa ümber lubati ka pöördliikumine.

4.5 Koormused

Koormused on erinevad jõud, mis mõjuvad kehadele simulatsiooni käigus. Mudelile on kehtestatud globaalne gravitatsioon väärtusega $-9,81 \text{ m/s}^2$ z-suunal. Lisaks mõjutab jää kõiki elemente ujuvus, mille simuleerimiseks on kasutatud allprogrammi. Et simuleerida korrektselt jää purunemist ning tükkide käitumist, peab ujuvus kehtima kõigi elementide kõigile tahkudele, mille simuleerimine Abaquses on komplitseeritud. Probleem on lahendatud välise käsuliini kasutamisega Abaquses koostatud tööfaili rakendamiseks. Allprogramm on koostatud Fortran formaadis ning selle kasutamiseks on vajalik Abaquse sidumine Intel OneAPI liidesega. Simulatsiooni tulemusena loodud andmefail on endiselt Abaquses loetav.

4.6 Kehade kontakt (vastasmõju)

Kehade omavahelise kontakti defineerimiseks tuleb kõigepealt luua interaktsioon. Siin defineeritakse erinevad pinnad, mis on omavahel kontaktis. Pinnad luuakse koostu moodulisse. Antud juhul on pindadeks "jääd" ja "sein", kus mõlema puhul on selekteeritud kogu vastav keha. Interaktsiooni all defineeritakse pindade paarid, mis omavahel kontaktis on. Nendeks paarideks on: *All-Self*, *Jää-Self*, *Jää-Sean*. *All* tähistab siinkohal kõiki välispindu, ääri ja analüütilisi pindu, v.a referentspunktid. *Self* tähistab pinna kontakti endaga.

Valitud paaridele kehtestatakse globaalne kontakttingimus (*contact property*), milleks on antud juhul *jää-jää*. Eraldi individuaalse tingimusena defineeritakse *jää-teras*, mis iseloomustab jää ja konstruktsiooni vastasmõju.

Kontakttingimus koosneb normaal- ja tangentsiaalsest komponendist, mis vastavalt defineerivad kontakti surve- ja nihkeparameetrid. Surve puhul on maksimaalseks läbistuseks elemendi suurus, misjärel toimub elemendi erosioon. Tangentsiaalse komponendi puhul on kasutatud staatilis-kineetilist eksponentsiaalselt kahanevat hõõrdumist. Hõõrdejõu arvutamine käib antud juhul hõõrdeteguriga

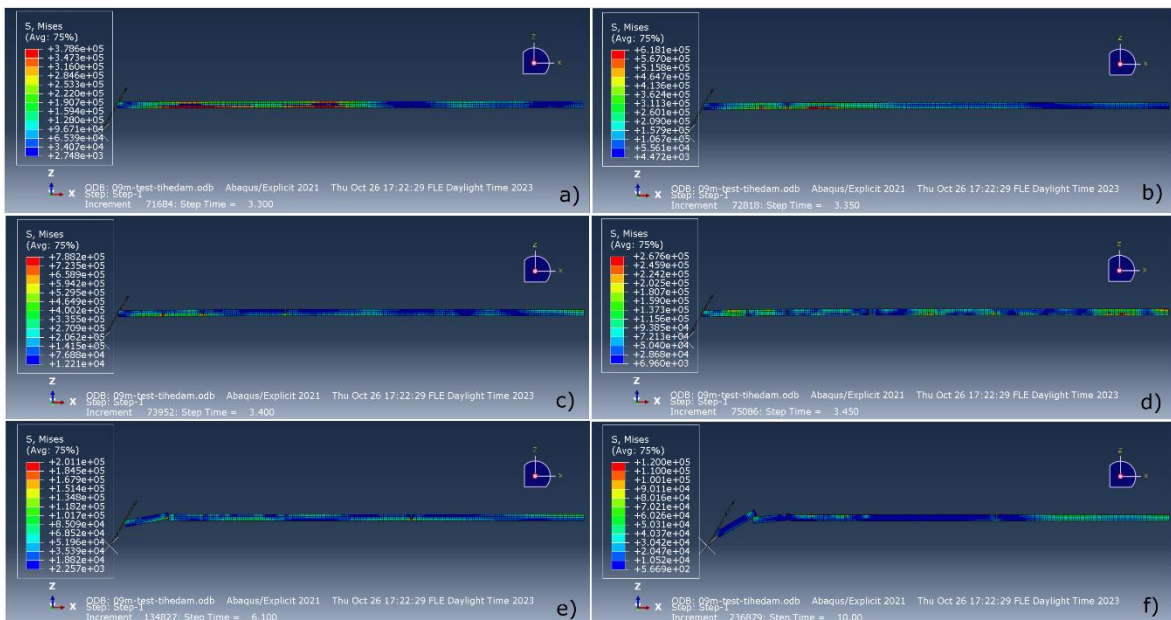
$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k)e^{-d_c y_{eq}}$, kus μ_s on staatiline hõõrdetegur, μ_k on kinemaatiline hõõrdetegur ja y_{eq} on libisemistegur, mille väärtused *jää-jää* puhul on vastavalt 10%, 5% ja 5, ning *jää-teras* puhul 20%, 10% ja 5. (DNV, 2014)

5 SIMULATSIOONIDE TEOSTAMINE JA TULEMUSED

5.1 Simulatsioon alparameetritega

Esimese katsena viidi läbi eelnevas peatükis kirjeldatud mudeli simulatsioon alparameetritega ning salvestati selle tulemused. Simulatsiooni käik on näidatud joonisel 5.1.

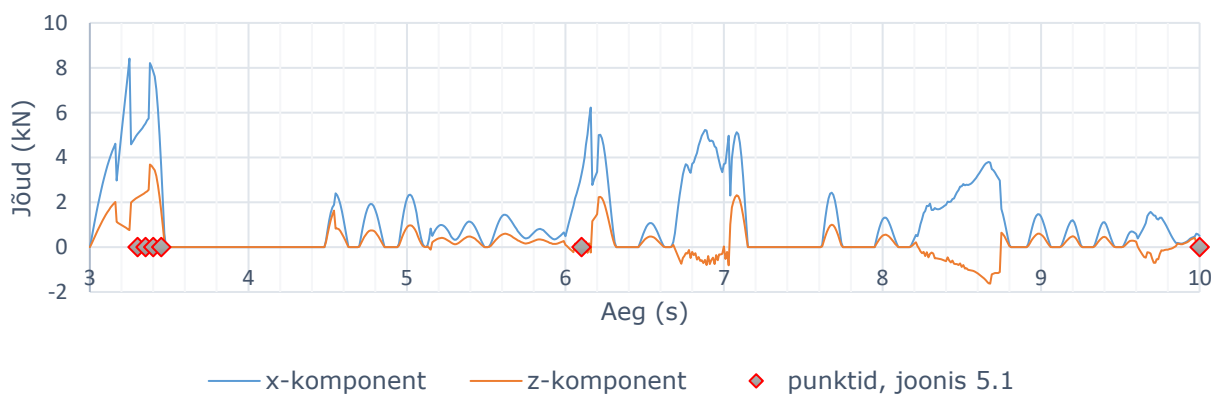
Kontakt kehade vahel tekib punktis 3 s ning seda iseloomustab esialgne seina penetratsioon jää materjali sisse. Kaldenurga tõttu kaasnevad penetratsiooniga survest ning paindest põhjustatud pinged jäätala sees (a), mis tipnevad purunemisega ülemistes kihtides (b). Purunemine areneb edasi allasuunal (jäljendades prao levikut) ning samaaegselt tekivad purunemised erinevates punktides, mis samuti arenevad allasuunal (c). Protsessi lõpuks on purunemine kõigis punktides läbinud terve tala ning kogu prao ulatuses on toimunud elementide erosioon (d). Pärast lühiajalist pausi (sõltuvalt elemendi mõõtudest) osutab jää liikuvale konstruktsioonile jätkuvalt vastupanu ning kaldenurga tõttu hakkab sein lükkama esimese tüki serva allapoole, roteerides tükki (e). Ujuvuse mõjul kerkib nimetatud tüki tagumine äär veeliini kohale ning liigub järgmise tüki peale, mille mõjul ka see tükk hakkab jäljendama eelmise liikumist (f). Kuna antud töö keskendub purunemise protsessile, ei peetud oluliseks pikendada simulatsiooni üle 10 sekundi ning seda pikkust kasutatakse ka järgnevas analüüsis.



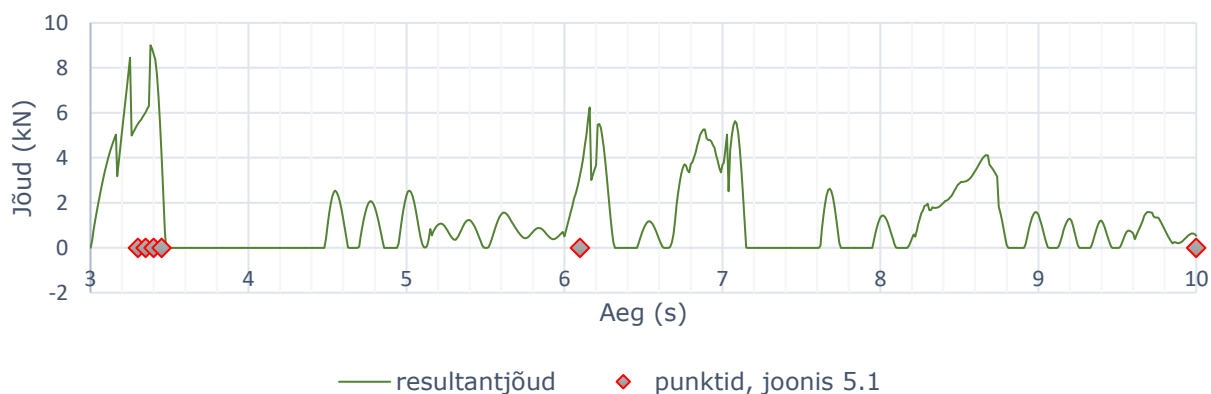
Joonis 5.1 Jää purunemise etapid

Joonistel 5.2 ja 5.3 on näha seinale mõjuva jõu x- ja z-komponendid, ning resultantjõud vastavalt. Ära on näidatud ka joonise 5.1 ajalised punktid. Esiagne purunemise graafik jääb ligikaudu 0,5 sekundi sisse, ning ühtib nelja punkti katse andmetega nii ajalisel kui kujult. Ebaühtlus on tingitud seinä kaldenurgast põhjustatud staatilise takistusjõu üleminekust dünaamiliseks, millele järgneb jää serva libisemine mööda seinä allasuunal ning sellest tulenev pingete vähenemine, mis protsessi jällegi peatab. Suurimad mõõdetud jõud on 8410 N surve (x-komponent), 3686 N paine (z-komponent) ning 8997 N resultantjõud.

Elementide erosiooni tõttu on graafikutes pikad lõigud ilma vastupanuta, mida plaanitakse vähendada elemendi pikkuse vähendamise läbi. Samuti võib seda nimetada käesoleva töö katsemeetodi üheks puuduseks, kuna (erinevalt talast) jääplaadi ja ruumilise keha (nt. koonuse) kokkupõrkel levib purunemine radiaalselt mitmes suunas ning kontakt kehade vahel on ühtlasem. Samuti vajab uurimist läbistuse (overclosure) käitumine jää purunemise hetkel, mis võib tõugata jäätüki seinast eemale.



Joonis 5.2 Seinale mõjuv survejõud (x-komponent) ja paindejõud (z-komponent)

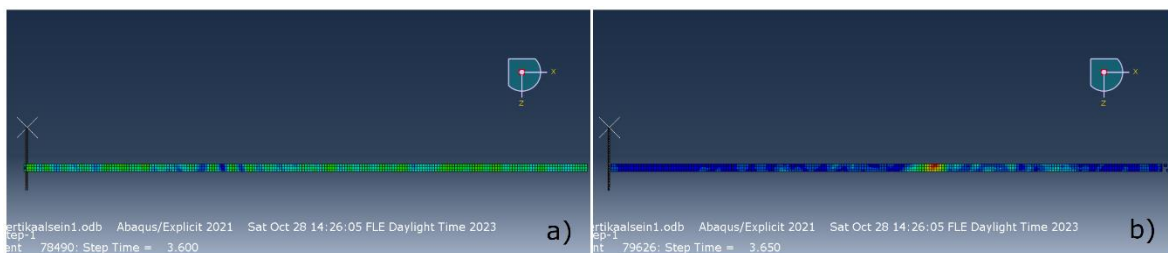


Joonis 5.3 Seinale mõjuv resultantjõud

5.2 Konstruksiooni kaldenurk

Esimene ja kõige olulisem vaadeldav parameeter töös on konstruksiooni kaldenurk. Antud juhul on see sein nurk φ z-telje suhtes. 30-kraadise nurga juures on mudeli käitumine ootuspärane, mis võib nurga vähendamisel muutuda. Mudelile põhjalikuma hinnangu andmiseks otsustati testida seda kaldenurga $\varphi=0^\circ$ juures, st sein on vertikaalne. Kõik muud parameetrid jäeti katses võrdseks eelmise alapeatükiga.

Katse käik on näha joonisel 5.4. Esialgu toimub ootuspärane sein penetratsioon jää sisse (a), millele järgneb otsmiste elementide erosioon (b). Samaaegselt toimub erosioon ka tagumise otsa juures, kus toimub liikumiskiirangu tõttu arvatavasti pingete koondumine. Mudel käitub seega nii, nagu oleks jää surutud kahe võrdse pinna vahele. Antud juhul välistab see edasise analüüsi, kuna piirangu kadumise tõttu hakkab jää liikuma. Et mudeli tööd edasi analüüsida, on vaja see probleem lahendada. Lihtsaim lahendus on kasutada tala asemel piisavalt laia jääplaati, ning konstruksioonina ruumilist keha, nt koonust (nagu tegid Rosenthal ning Jeon & Kim) või silindrit. Sellisel juhul on tagumise kontakti pind oluliselt suurem ning purunemist ei toimu.



Joonis 5.4 Esialgne simulatsioon kaldenurga $\varphi=0^\circ$ juures

Käesoleva mudeli puuduste tõttu ei peetud õigustatuks edasiste simulatsioonide teostamist vertikaalse seadistusega, kasutades pikka tala. Selle asemel otsustati lühendada tala väiksema arvu elementide pikkuseks ning uurida detailsemalt esmase purunemise toimumist. Teemat käsitletakse edasi alapeatükis 5.5.

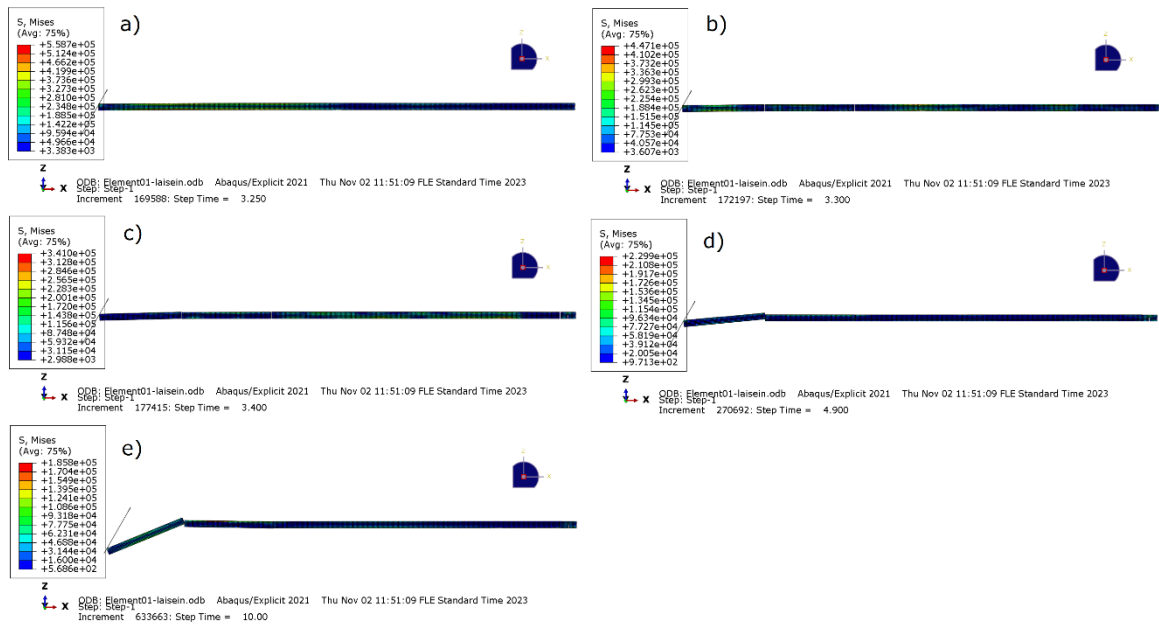
5.3 Elemendi suurus jää materjalis

Elemendi pikkus on üks parameetritest, mille mõju uurimine simulatsiooni tulemustele on käesoleva töö eesmärk. Eelnevatest katsetest järeldus, et vähendades elemendi suurust, võib olla võimalik ühtlustada suuri kõikumisi ja pause jõudude graafikutes, muutes sellega mudelit lähedasemaks eksperimentaalsele katsele. Samuti on jää tegelikku purunemist arvesse võttes elemendi pikkus 0,2 m võrdlemisi suur. Selle parameetri mõju uurimiseks otsustati läbi viia alapeatükis 5.1 kirjeldatud katse,

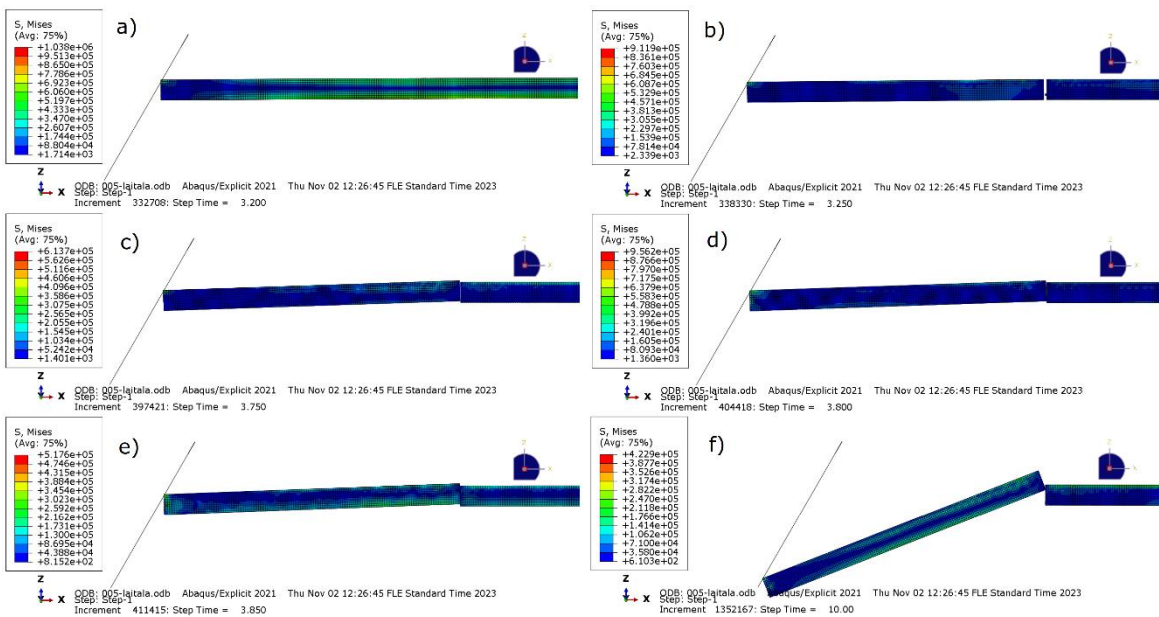
kasutades elemendi pikkusi 0,1 m ja 0,05 m. Joonistel 5.5 ja 5.6 on näidatud jää purunemise protsessi käik elemendi L_e väärtuste 0,1 m ja 0,05 m juures vastavalt.

Esimesel juhul toimub jää purunemine üheaegselt kahes punktis (b), millele järgneb purunemine tagumise otsa lähedal (c; tegu on ainsa katsega kus viimane esineb, ning vähendades tala laiust elemendi laiuusele, seda ei juhtu).

Teisel juhul toimub ristsuunaline purunemine ainult ühes punktis (b). Kontakti taastumise järel (c) tekivad kohalikud pinged kontaktpinna lähedal (d), millele järgneb marginaalne kihtpurunemine tala otsa keskel (e).



Joonis 5.5 Jää purunemine, $L_e=0,1$ m



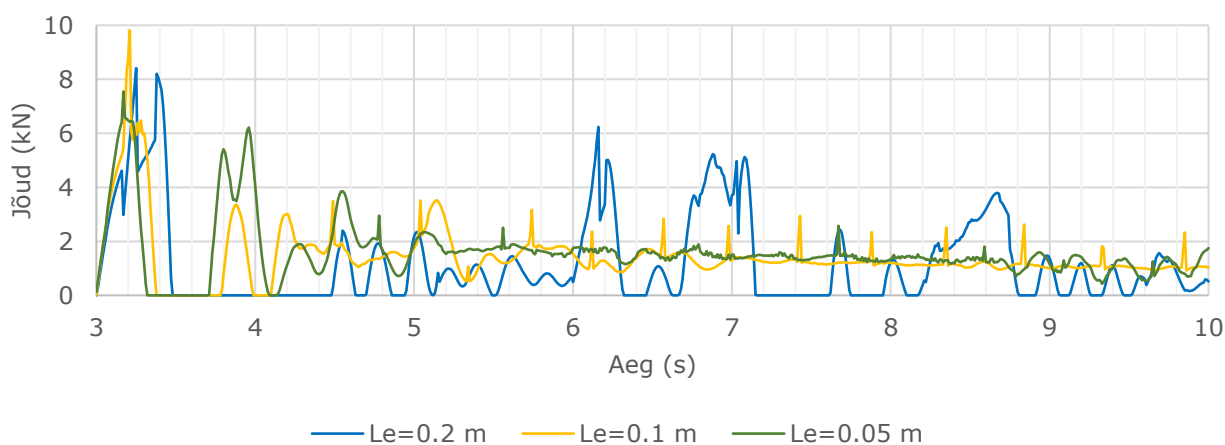
Joonis 5.6 Jää purunemine, $L_e=0,05$ m

Kõrvutades katseid erineva elemendi suurusega, väljendub selgelt purunemiskohtade arvu vähenemine koos elemendi suurusega. Sellega üheaegselt väheneb ka esmase purunemise järgne ajavahe sekundaarse kontakti tekkeni, millest avalduvad oluliselt suuremad pinged. Katse elemendi pikkuse 0,05 m juures andis seega tulemuse, mida võib pidada kõige lähedasemaks purunemisele looduslikus keskkonnas.

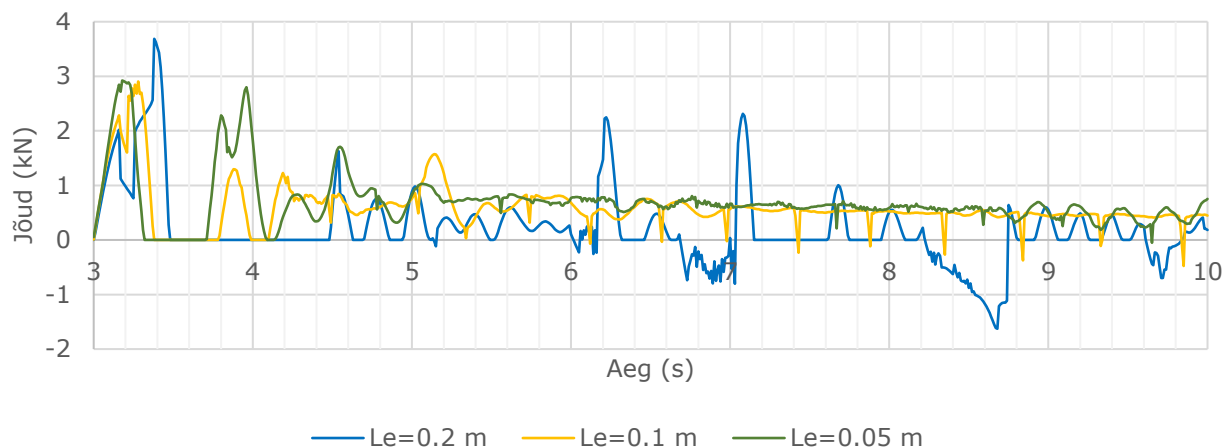
Joonistel 5.7, 5.8 ja 5.9 on avaldatud kontakti toimel seinale mõjuva jõu x-komponent, z-komponent ja resultantjõud vastavalt, kolme erineva L_e väärtuse võrdluses. Võrreldavuse huvides on kasutatud konstantset tala laiust $B=0,2$ m. Suurimad väärtused on avaldatud tabelis 5.1. Selgelt on näha graafikute ühtlustumist väiksema L_e väärtuse juures. Samuti väheneb aeg, mis kulub esmasest kontaktist kuni esmase purunemise tekkeni. Seda võib seletada ka läbistussügavuse (L_{oc}) vähenemisega, mis on alati võrdne elemendi pikkusega. Seega, mida väiksem on läbistussügavus, seda kiirem on kontaktjõu kasv. Oluline erinevus avaldub ka esmasele purunemisele eelneva graafiku kujus: elemendi suuruse vähenedes muutub see ühtlasemaks, järjest sarnasemaks joonisel 4.4 kujutatule.

Tabel 5.1 Katsetes mõõdetud suurimad jõud ja ristsuunaliste purunemiskohtade arv, $L_{oc}=L_e$

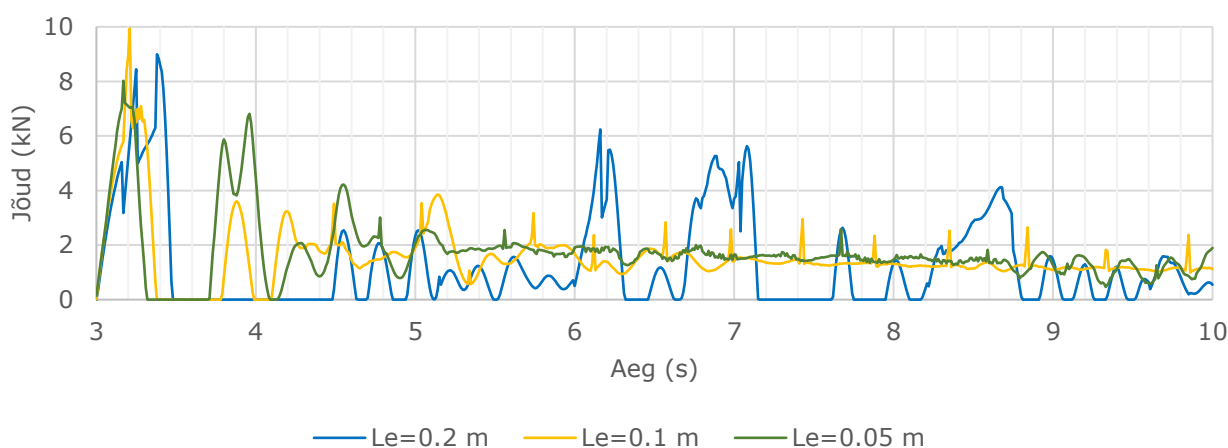
L_e (m)	Suurim survejõud (N)	Suurim paindejõud (N)	Suurim resultantjõud (N)	Purunemis-kohtade arv
0,2	8410	3686	8997	3
0,1	9812	2904	9942	3
0,05	7547	2923	8021	1



Joonis 5.7 Kontaktjõu x-komponent, võrdlus, $L_{oc}=L_e$



Joonis 5.8 Kontaktjõu z-komponent, võrdlus, $L_{oc}=L_e$



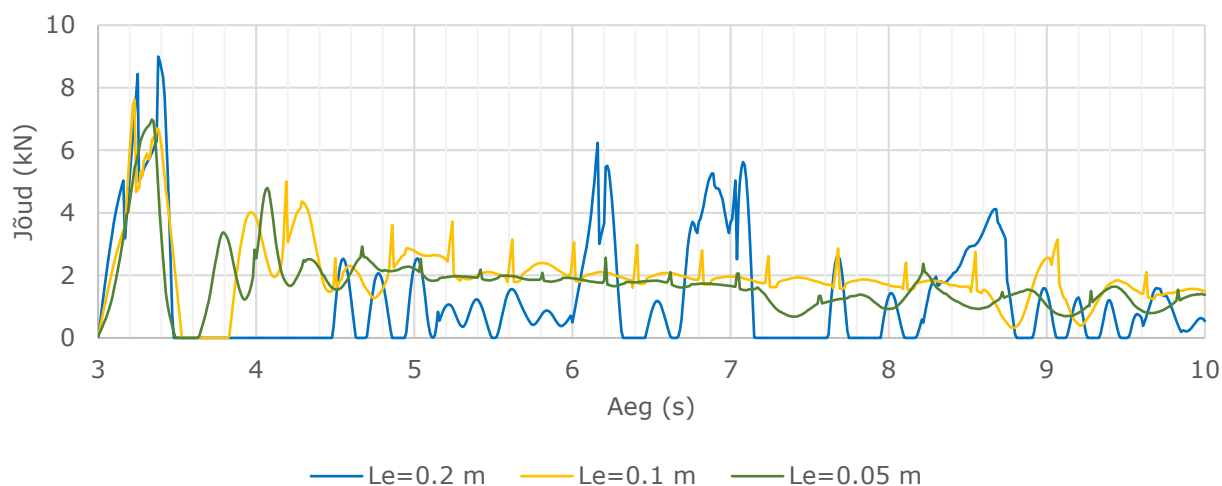
Joonis 5.9 Kontakti resultantjõud, võrdlus, $L_{oc}=L_e$

Kontrolli eesmärgil viidi samad katsed läbi ka nii, et L_{oc} väärtus jäeti konstantseks 0,2 m juurde. Nii loodi võimalus vaadelda elemendi suuruse mõju isoleeritult. Mõlemal juhul ($L_e=0,1\text{ m}$ ja $L_e=0,05\text{ m}$) toimus purunemine sarnaselt joonisele 5.6 ning tekkis ainult üks murdekoht. Otsa juures elementide erosiooni (joon 5.6, e) ei toimunud. Joonisel 5.10 on näidatud resultantjõud kolme erineva L_e korral ning jõudude maksimumid on avaldatud tabelis 5.2.

Sarnaselt eelnevatele katsetele on näha graafikutel ühtlustumist, jõu kõikumiste amplituudi vähenemist ja „pauside“ kadumist (va esmase purunemise järel). Kõnealune ühtlustumine on isegi suurem kui eelnevates katsetes, kus läbistussügavust vähendati koos elemendi suurusega. Kõige olulisem erinevus avaldub esimese poole sekundi osas, esmasest kontaktist kuni purunemiseni. Siin on kadunud graafiku „nihkumine“ vasakule ning kõik kolm graafikut suures osas kattuvad. Samuti toimub purunemine enam-vähem samal ajahetkel. Väiksema elemendi suurusega kaovad ka „teravikud“, mis avalduvad esimese poole sekundi graafikutes, ning sellest tulenevalt on väiksemad ka mõõdetud maksimumid.

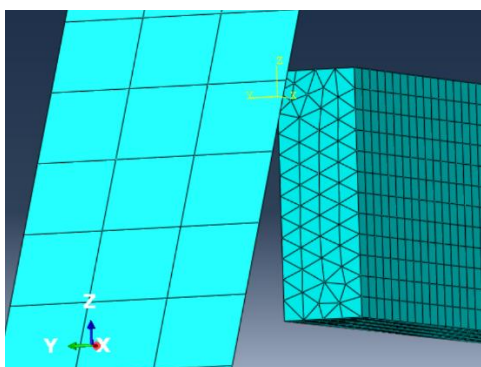
Tabel 5.2 Katsetes mõõdetud suurimad jõud ja ristsuunaliste purunemiskohtade arv, $L_{oc}=0,2$ m

L_e (m)	Suurim survejõud (N)	Suurim paindejõud (N)	Suurim resultantjõud (N)	Purunemiskohtade arv
0,2	8410	3686	8997	3
0,1	7558	2731	7619	1
0,05	6382	2838	6984	1



Joonis 5.10 Kontaktjõud - resultantjõud, võrdlus, $L_{oc}=0,2$ m

Kuigi üldjoontes on nii elemendi suuruse kui läbistussügavuse mõju katsetulemustele tuvastatav, tuleb siiski teha mõningaid mööndusi järelduste tegemisel. Näiteks elementide arvu suurendamisel detailis võib muutuda nende paiknemine. Abaquse puhul võre (*mesh*) koostamisel servade markeerimise meetodil on elementide paiknemine sümmeetriline nii $L_e=0,2$ m kui $L_e=0,1$ m juures, kuid see sümmeetria kaob osaliselt $L_e=0,05$ m juures, mis on näha joonisel 5.11. Põhjuseks on ilmselt asjaolu, et Abaqus üritab elemendi pikkust L_e rakendada elemendi kõigile külgedele, luues võrdkülgseid kolmnurkprismad. Sellest tulenevalt võib toimuda ka teatud ulatuses näiteks suurem jõukõikumiste ühtlustumine graafikutes.



Joonis 5.11 Elementide paiknemine jää ristlõikes, $L_e=0,05$ m

Kõiki katsetes avaldunud erinevusi arvestades saab parima tulemuse kasutades võimalikult väikesemõõdulisi elemente, ainus piirav tegur on sealjuures simulatsiooni arvutuslik maht. Suuremamõõduliste detailidega simuleerimisel ei pruugi elemendi suurus 0,05 m olla efektiivne.

Kui üldiselt teostati kõik simulatsioonid võrdlemisi kiirelt, siis elemendi pikkuse vähendamine 0,05 meetrile kasvatas hüppeliselt simulatsiooni ressursimahukust. Kasutades kaasaegset arvutit protsessoriga Intel Core i7-12700H ning hõivates 6 tuuma 14-st, võttis simulatsioon aega ligikaudu 5 tundi.

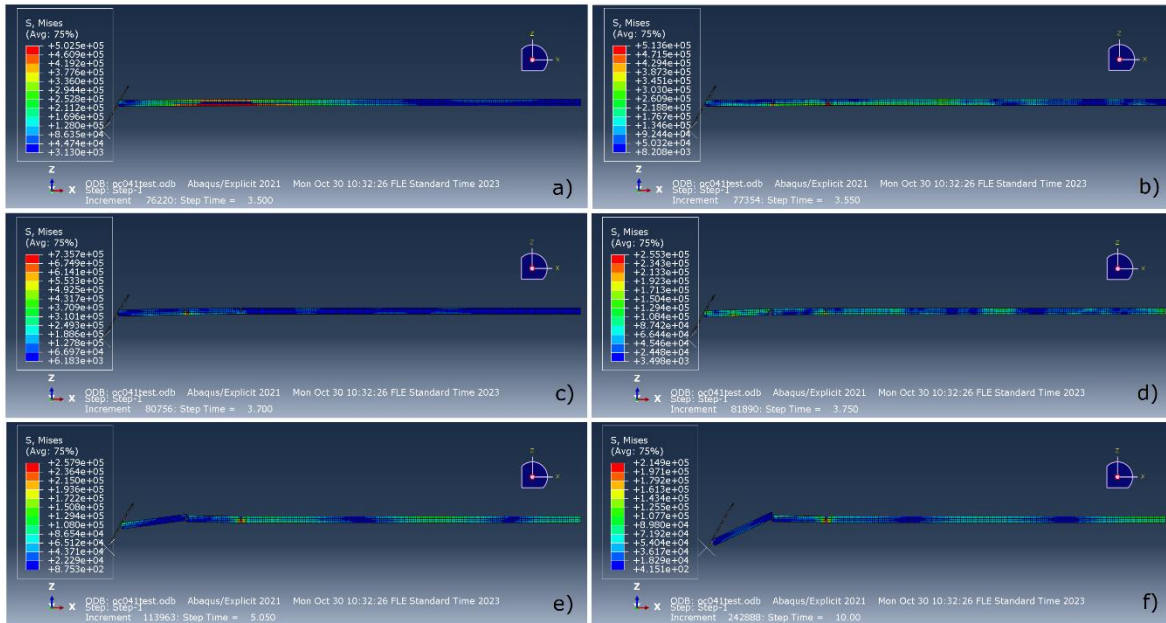
Kõigest eelnevast lähtuvalt on käesoleva töö autori poolne soovitus kasutada edasistes uuringutes elemendi suurust $L_e \leq 0,1$ m.

5.4 Läbistussügavus (ingl k *overclosure*)

Käesoleva mudeli simulatsioonides kasutatakse lokaalse survepurunemise jäljendamiseks erosioonimeetodit. Sellega on lubatud elementide läbistus üksteise sisse ning läbistuse jõudmisel teatud väärtuseni element kustutatakse. Kõnealune väärtus on defineeritav vastasmõju parameetrite (*interaction properties*) all läbistussügavusena (*overclosure*). Tavaolukorras kasutatakse läbistussügavuse väärtust, mis on võrdne elemendi suurusega, st kui läbistus ületab elemendi pikkust, siis element kustutatakse. Edaspidi on läbistussügavus tähistatud ka kui L_{oc} .

Et uurida selle parameetri mõju, sooritati katsed L_{oc} väärtustega $2*L_e$ ning $0,5*L_e$. Kõigepealt rakendati neid väärtusi alapeatükis 5.1 kirjeldatud katses.

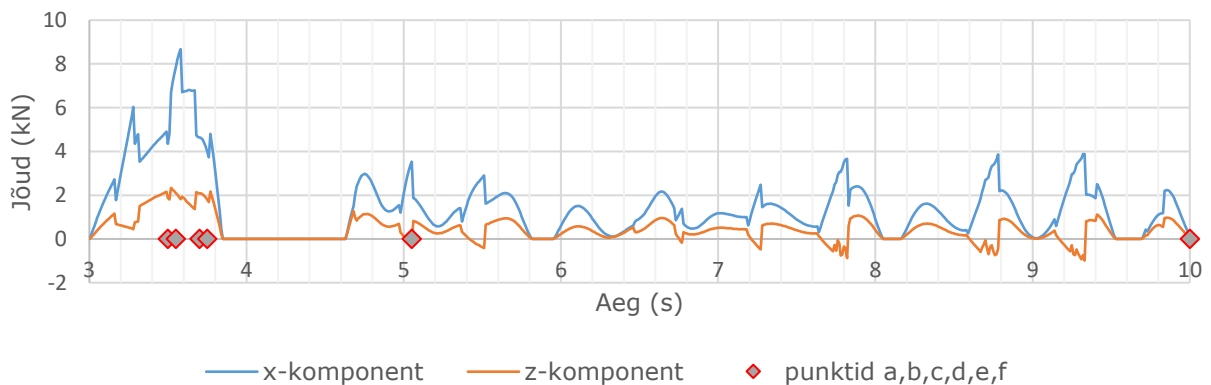
Joonisel 5.12 on näha simulatsiooni käik $L_{oc} = 0,4$ m = $2*L_e$ juures. Esialgne läbistus ning tala paine toimub sarnaselt esialgsele katsele, kuigi pinge jaotus on mõnevõrra erinev (a). Erinevalt esimesest katsest tekib purunemine kahes punktis (b). Materjali murdumise asemel kogu paksuse ulatuses hakkab purunemine lähemas punktis arenema külgsuunal ning kaugemas punktis areng peatub (c). Lühikese aja pärast toimub lähemas punktis erosioon ka alumistes kihtides ning tükk eraldub (d). Kaldenurga ja hõõrdejõu mõjul hakkab eraldunud tükk roteeruma ning katkekoha ebahõltsuse tõttu järgmise (osaliselt eraldunud) tüki serva üles lükkama (e). Tekkinud murdekoha ning mittetäieliku purunemiskoha vastupanu tõttu hakkab eraldunud jäätüki serv liikuma mööda kaldseina vee alla (f).



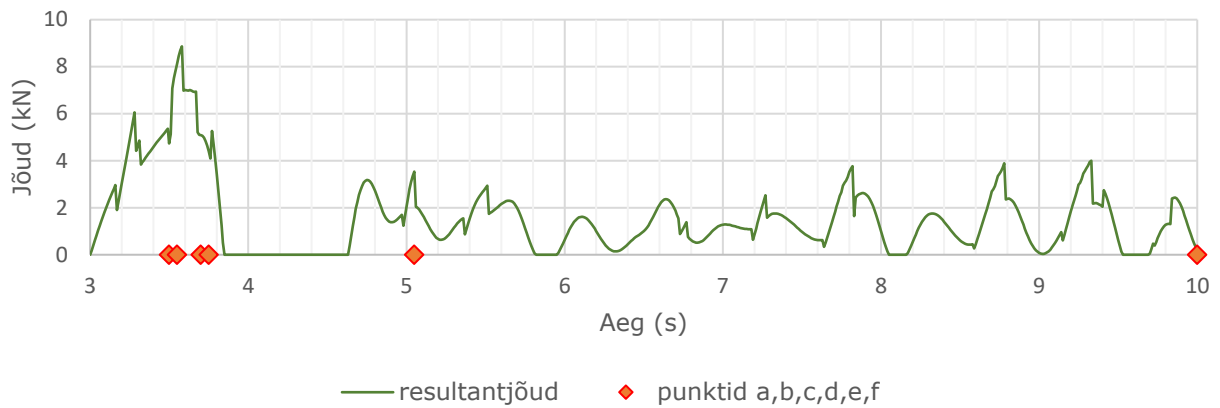
Joonis 5.12 Peatüki 5.1 katse $L_{oc} = 0,4 \text{ m} = 2 * L_e$ juures

Katse käik on küll erinev esialgsest: tekkis vähem murdekohti, delaminatsioon lähimas murdekohas koos järgnenud „takerdumisega“, ning üks mittetäielik murdumine; siiski sarnaneb mudeli käitumine jää looduslikule purunemisele ning erinevused ei ole fundamentaalsed.

Joonistel 5.13 ja 5.14 on näha jää-seina kontaktjõu x- ja z-komponendid, ning resultantjõud vastavalt. Suurimad mõõdetud jõud on 8676 N surve (x-komponent), 2335 N paine (z-komponent) ning 8863 N resultantjõud. Suurim paindejõud on esialgse katsega võrreldes ligi kolmandiku võrra väiksem, kuna vastaval graafikul puudub katsele iseloomulik „tipp“. Samuti on purunemise kestus pikem: 0,5 s asemel ligi 0,8 s, mis arvatavasti on tingitud delaminatsioonile järgnenud paindest. Esialgsele purunemisele järgnevad kontaktist põhjustatud kõikumised on samuti ühtlasemad, ühteti paindesse salvestunud energia tõttu, teisalt tänu suuremale lubatud penetratsioonile.

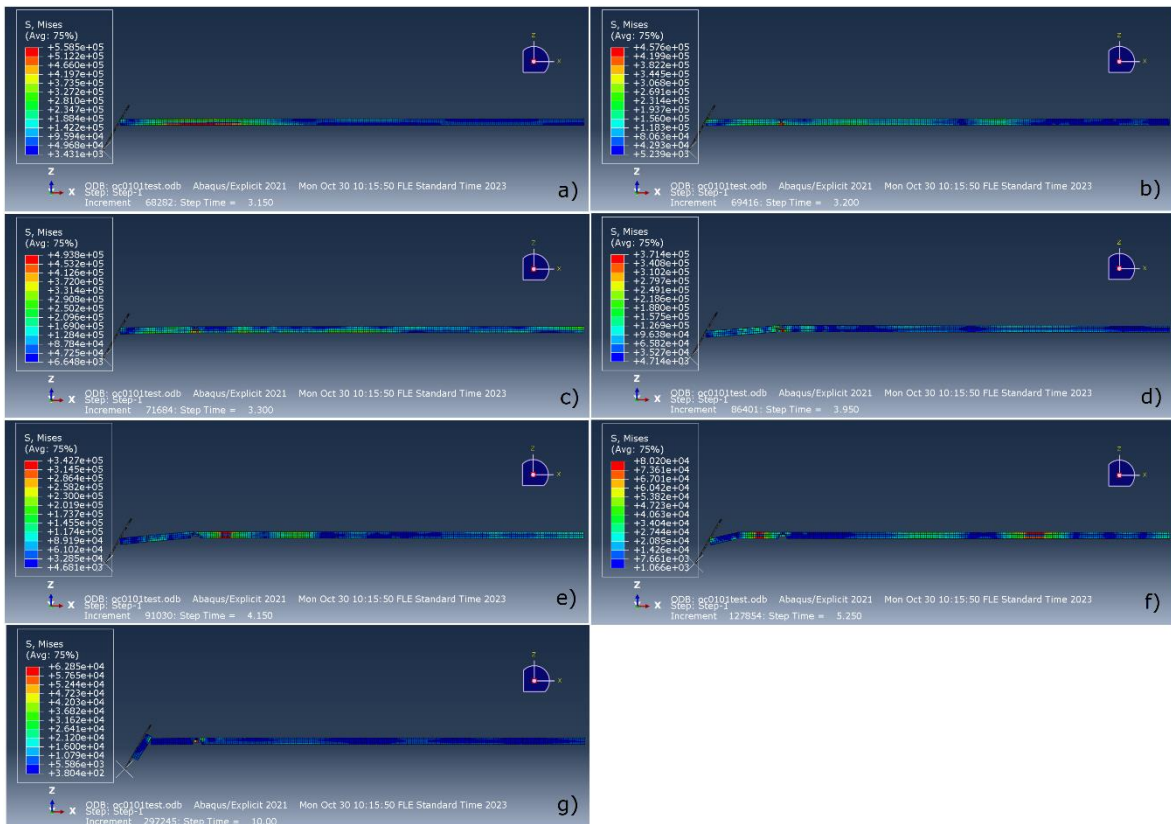


Joonis 5.13 Peatüki 5.1 katse $L_{oc} = 0,4 \text{ m} = 2 * L_e$ juures, surve- ja paindejõud



Joonis 5.14 Peatüki 5.1 katse $L_{oc} = 0,4 \text{ m} = 2 * L_e$ juures, resultantjõud

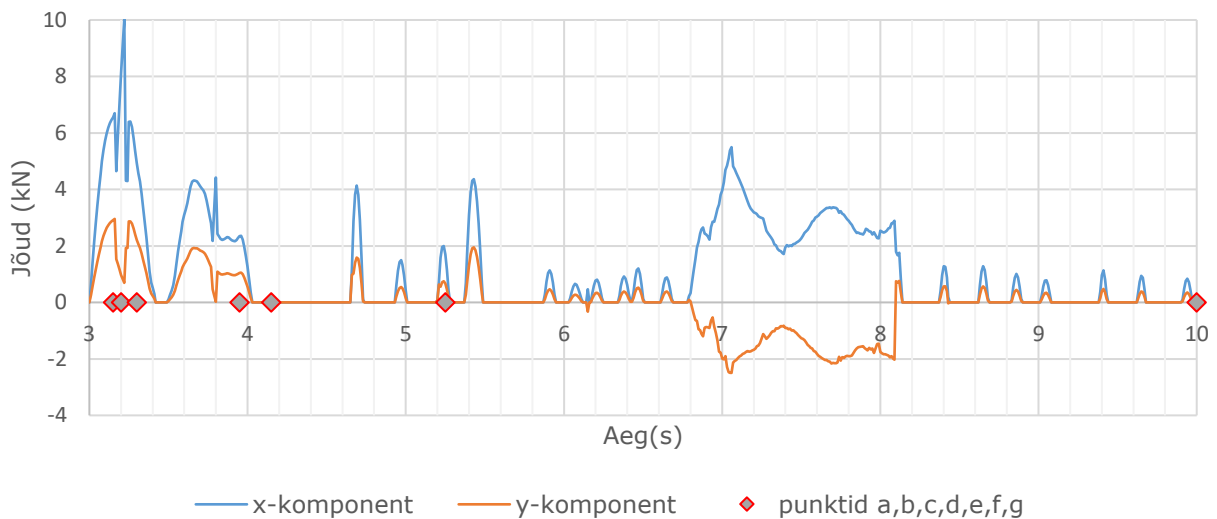
Joonisel 5.15 on sooritatud sama katse $L_{oc} = 0,1 \text{ m} = 0,5 * L_e$ juures. Materjal murdub seekord ühest kohast (b) koos delaminatsiooniga (c), ning lõpuks eraldumisega (d), tekitades ka murdekohal väiksema eraldunud tüki (e). Kuna murdunud tükk on seekord pikem ning lükatakse vee alla, tekib selles sekundaarne murdekoht (e). See võib olla osaliselt tingitud ka progressiivse purunemise protsessist. Järgnevalt toimub tavapärase tükide kokku surumine koos sellest põhjustatud liikumiste ja rotatsioonidega (f, g).



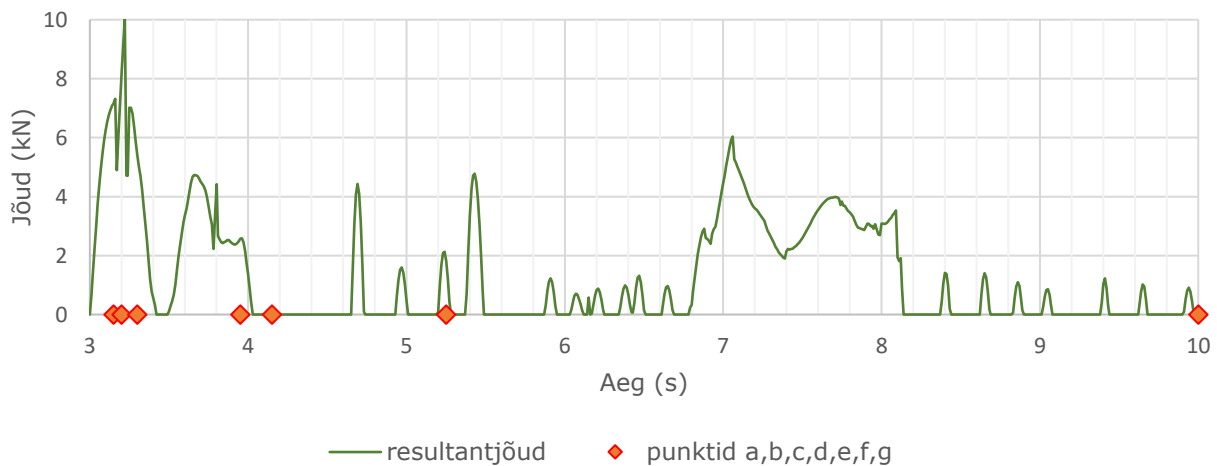
Joonis 5.15 Peatüki 5.1 katse $L_{oc} = 0,1 \text{ m} = 0,5 * L_e$ juures

Katse käik on taas erinev, kuigi iseloomulik jää mudelile. Tänu vähesemale ruumile penetratsiooni näol saavutatakse nii paine kui murdumine kiiremini. Samas toimus murdumine kahes osas ja oli sellest lähtuvalt kõigest katsetest pikim. Joonistel 5.16 ja 5.17 on näha katse x- ja z-komponentide, ning resultantjõu graafikud vastavalt. Suurimad mõõdetud jõud on 10023 N surve (x-komponent), 2956 N paine (z-komponent) ning 10047 N resultantjõud.

Tükkide roteerumine ja nihkumine üksteise peale on lähedasem esialgsele katsele ning sellest tulenevalt ka suuremad sarnasused graafikutes, kuigi väiksema penetratsiooni tõttu esinevad teravamad isoleeritud impulsid. Seega võib öelda, et suurem lubatud penetratsioon annab ühtlasemad graafikud ja pikema purunemise protsessi. Just viimast tegurit võib pidada lahknevuseks jää tavapärasest käitumisest ning mudeli parema täpsuse saavutamiseks on seega soovitatav jätta läbistussügavus vähemalt võrdseks elemendi mõõduga ning kasutada ühtlasema tulemuse saamiseks mudelis väiksemaid elemente.



Joonis 5.16 Peatüki 5.1 katse $L_{oc} = 0,1 \text{ m} = 0,5 * L_e$ juures, surve- ja paindejõud



Joonis 5.17 Peatüki 5.1 katse $L_{oc} = 0,1 \text{ m} = 0,5 * L_e$ juures, resultantjõud

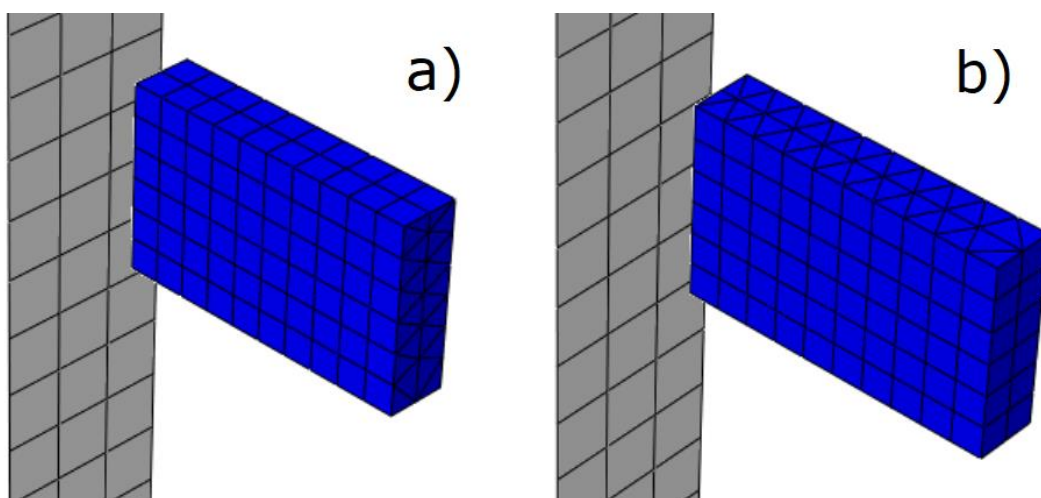
5.5 Läbistussügavuse katse $\varphi=0^\circ$ juures

Läbistussügavuse ning kaldenurga mõju uurimiseks otsustati jätkata katsetega vertikaalse seinaga, st $\varphi=0^\circ$ juures. Kuna pika tala mudel ei andnud soovitud tulemusi, lühendati seda pikkusele 1 m, et keskenduda esmase purunemise protsessi uurimisele erinevatel parameetritel. Käesoleva simulatsiooni pikkus on 2 s, kus esmane kontakt luuakse 1 s pärast algust, kokkupõrke kiirusel 0,3 m/s. Elemendi suurus valiti lähtuvalt eelnevatest katsetest $L_e=0,1$ m, mis on täpsust ja arvutusmahtu silmas pidades optimaalne.

Katsetes uuritakse läbistussügavuse mõju jää purunemisele. Kasutusel on kolm seadistust:

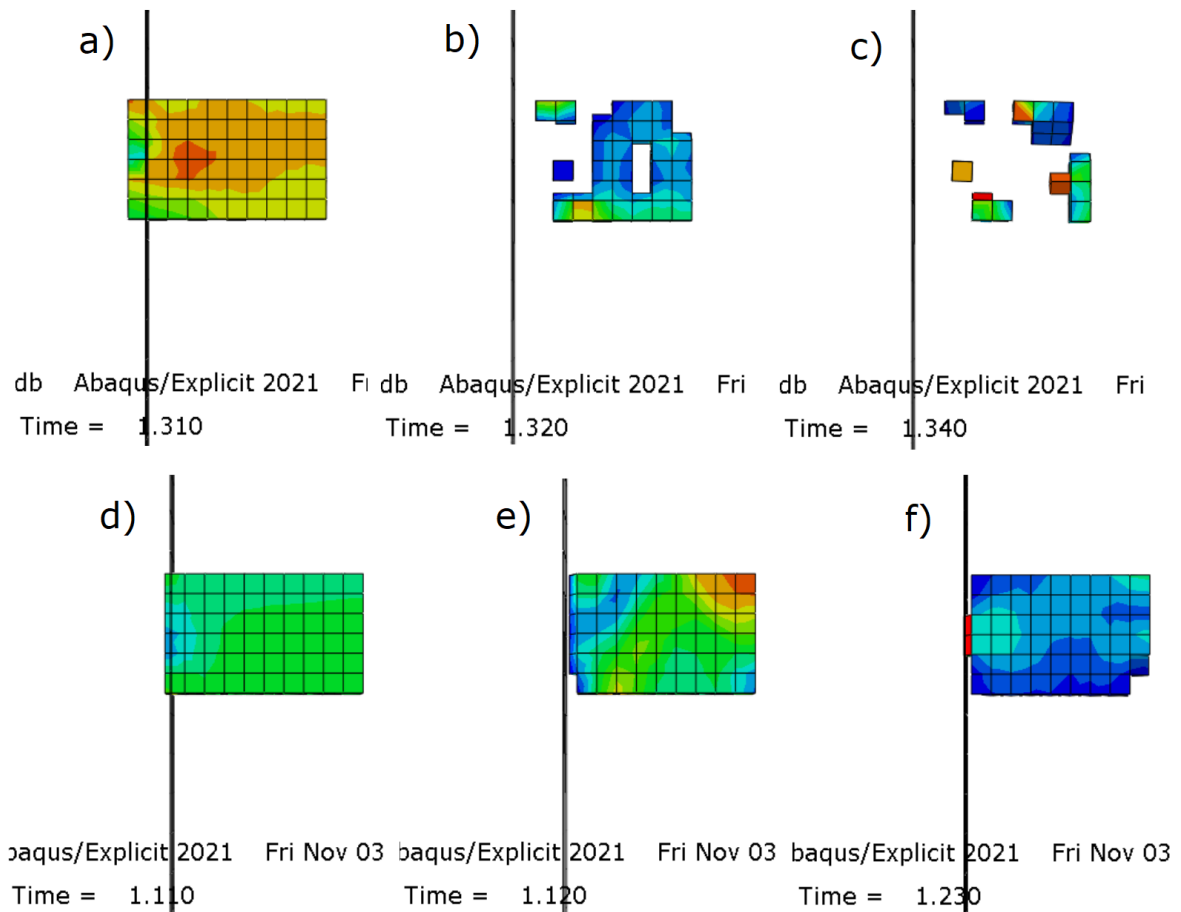
- $L_{oc} = 0,05 \text{ m} = 0,5 * L_e$
- $L_{oc} = 0,1 \text{ m} = 1 * L_e$
- $L_{oc} = 0,2 \text{ m} = 2 * L_e$.

Sellele lisaks muudetakse elementide paiknemist jää materjalis: kui eelnevas töös kasutatud materjalis paiknevad elemendid nii, et nende diagonaaltasapinnad ristuvad yz-tasapinnaga, siis käesolevad katsed sooritatakse lisaks jääga, mille elementide diagonaaltasapinnad ristuvad xy-tasapinnaga. Kõnealused seadistused on näidatud joonisel 5.18. Kui esimene seadistus (a) on sobilik jää murdumise uurimiseks kokkupõrkel kaldpinnaga, siis survepurunemise uurimisel kokkupõrkel vertikaalpinnaga on eelistatud teine seadistus (b). Üldiselt on xy-seadistus (b) eelistatud suurtes simulatsioonides laia jääplaadiga, kuna simuleerib täpsemalt radiaalsete pragude teket, st praod tekivad lihtsamalt rohkematel erinevatel suundadel. Lisaks oletatakse, et teise seadistuse puhul on võimalik saavutada ühtlasem purunemine.



Joonis 5.18 Läbistussügavuse katsetes kasutatud jää elementide seadistused: diagonaalid yz-tasapinnal (a), diagonaalid xy-tasapinnal (b)

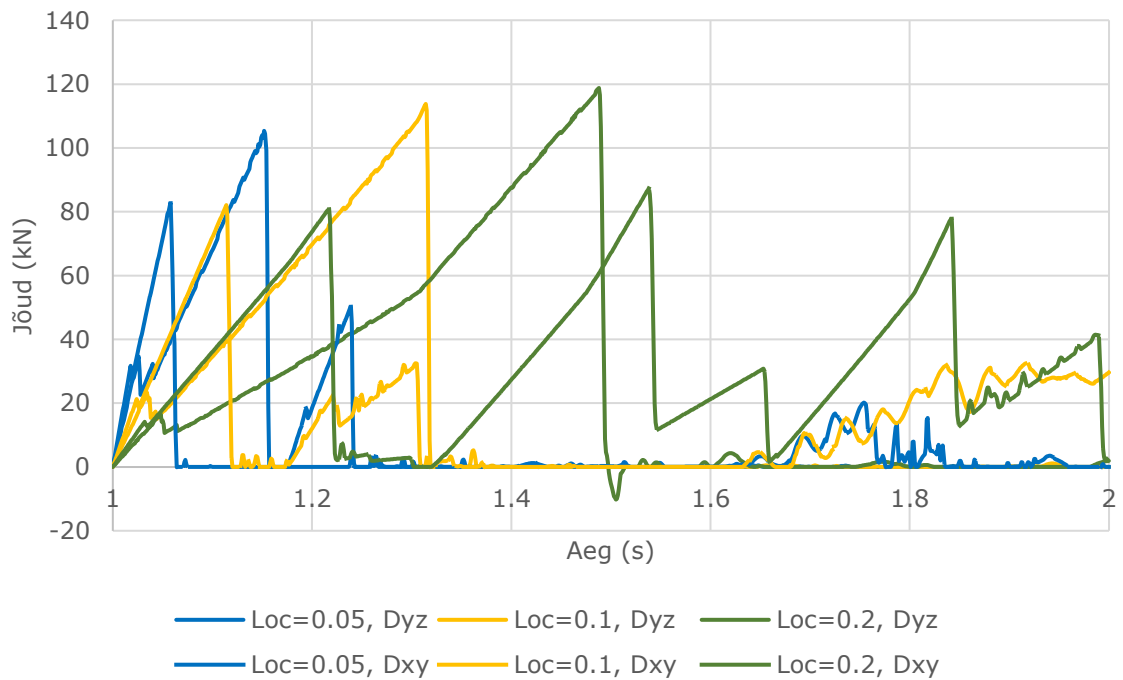
Joonisel 5.19 on näha jää purunemise käik yz-diagonaalseadistuse juures (a, b, c) ning xy-seadistusega (d, e, f). Mõlemal juhul on kasutusel elemendi suurus $L_e = 0,1 \text{ m} = L_{oc}$. Erinevused on märkimisväärsed. Esimesel juhul läbib sein jääd kogu elemendi ulatuses, pärast mida toimub „plahvatuslik“ edasiulatuv erosioon kogu keha ulatuses. Teisel juhul on purunemine järkjärguline ning sünkroonis seina liikumisega, teatud määral suunaga äärtelt keskele. Sellest järeldub, et teine seadistus on üldjoontes sobilikum seda laadi simulatsioonide teostamiseks.



Joonis 5.19 Jää purunemise võrdlus erinevate elementide paigutuste juures: diagonaalid yz tasapinnal (a, b, c) ja diagonaalid xy tasapinnal (d, e, f)

Joonisel 5.20 on avaldatud seinale mõjuvad kontaktjõud kõigis kuues katses. yz-diagonaalseadistuse (D_{yz}) juures kasvab surve aeglasemalt ning jõuab kõrgemate väärtusteni, võrreldes xy-seadistusega (D_{xy}), kus jõu kasv on kiirem ning madalamad tipud saavutatakse varem. Suurimad mõõdetud kontaktjõud on avaldatud tabelis 5.3. Kui D_{yz} juures kasvavad nimetatud tipud koos läbistussügavusega, siis D_{xy} puhul on läbistussügavuse mõju neile vähene. Nagu ka eelnevas katses, on läbistussügavuse mõju kontaktjõu kasvule pöördvõrdeline ning suurema L_{oc} väärtuse juures saavutatakse purunemine hiljem. Mõningaid mööndusi järelduste osas tuleb samas teha asjaolu tõttu, et xy-seadistuse juures (joon 5.18, b) on esimese rea elementide pikkus väiksem, mis

võib osaliselt olla varasema purunemise ning väiksemate maksimumide saavutamise põhjus.



Joonis 5.20 Mõõdetud kontaktjõud erinevate L_{oc} väärtuste juures, kahe erineva elementide konfiguratsiooni juures

Tabel 5.3 Läbistussügavuse katsetes mõõdetud suurimad kontaktjõud

L_{oc} (m)	Elementide paigutus	Suurim kontaktjõud (N)
0,05	yz (a)	105 377
0,1	yz (a)	113 748
0,2	yz (a)	118 854
0,05	xy (b)	83 075
0,1	xy (b)	82 126
0,2	xy (b)	87 361

6 TULEMUSTE ANALÜÜS

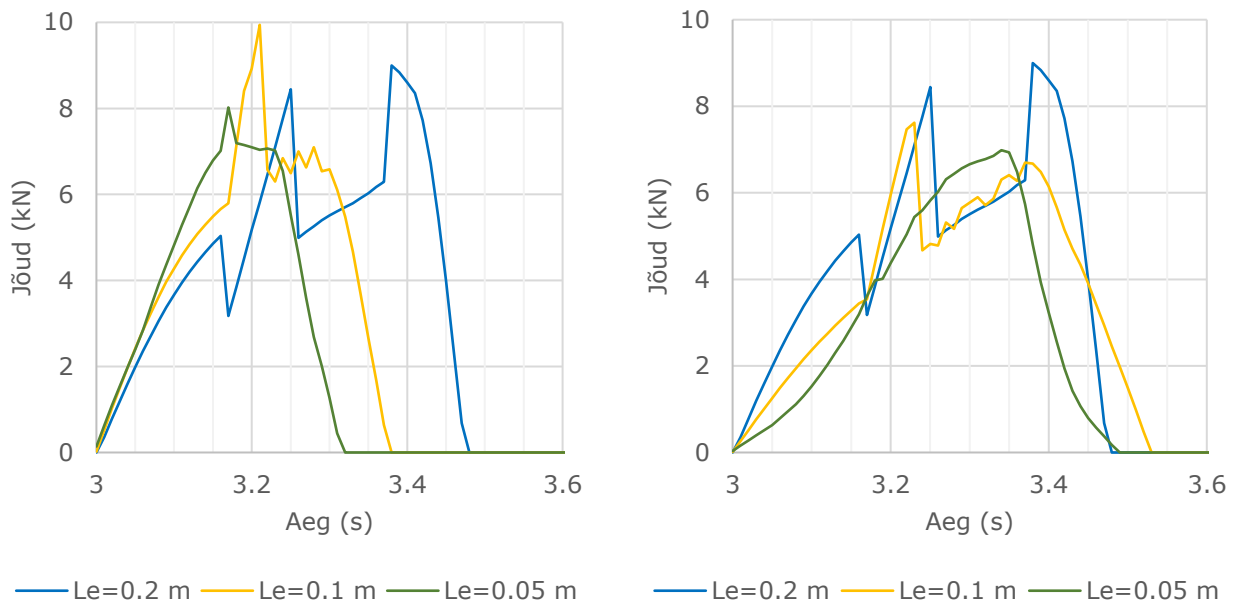
Käesoleva töö käigus viidi läbi suur hulk simulatsioone erinevate parameetritega, et näha nende mõju jää ja konstruktsiooni vastasmõju protsessile. Eesmärk on raporteerida neist olulisemate tulemusi sobiva detailsuse ning mahuga, et tagada piisavalt pidepunkte edasiseks tööks.

6.1 Parameetrite mõju

Kuna jää purunemise protsess ning sellele järgnev liikumine ja interaktsioon võib olla ka looduses suurte variatsioonidega, on spetsiifiliste parameetrite mõju sellele keeruline tuvastada. Luues rea katseid kindla parameetri erinevate väärtustega, üritati käesoleva töö tulemusena paremini defineerida iga parameetri mõju. Suuremas osas see ka õnnestus, kuigi teatud määral tuleb siiski lähtuda ratsionaalsetest teoorial põhinevatest oletustest.

Konstruktsiooni kaldenurk φ on antud juhul olulisim parameeter, sest mõjutab simulatsiooni tulemusi kõige enam. Tõstes φ väärtust, tõuseb z-suunaliste painet tekitavate jõudude osakaal kontaktjõududes. Samal ajal väheneb konstruktsioonile mõjuv resultantjõud (mida näitas ka Rosenthal). φ lähenedes 0-le läheneb samuti 0-le z-suunaline kontaktjõud. $\varphi=30^\circ$ juures mõõdeti maksimaalseks x-suunaliseks jõuks 8410 N ning z-suunaliseks 3686 N, mis moodustab eelmisest ligikaudu 44%. $\varphi=0^\circ$ juures kahanes z-komponent marginaalseks.

Nii elemendi suurus L_e kui läbistussügavus L_{oc} (*overclosure*) mõjutavad nähtavalt simulatsiooni tulemusi. L_e väärtuse vähenedes väheneb nõ pauside pikkus ja arvukus kontaktjõu graafikutes, samuti väheneb kõikumiste amplituud ning „teravike“ esinemine. Kasutades väiksemat elemendi suurust, tekkis jääs reeglina ainult üks murdekoht, samas kui algparameetritega katses (pt 5.1) tekkis neid samaaegselt 3. Joonisel 6.1 on näha kontaktjõu resultantjõu graafikud alates esmasest kontaktist kuni esmase purunemiseni. Siin on näha „teravike“ kadumist väiksema elemendi suuruse korral, samuti graafiku nihkumist ajas ettepoole, juhul kui koos elemendi suurusega vähendati läbistussügavust. Jättes läbistussügavuse konstantseks, on siiski näha vähene purunemise algushetke nihkumine ettepoole, samas lõpphetk oluliselt ei muutu. Põhjuseks võib olla nii elemendi suurus kui teatavad erinevused paiknemises (kolmandal juhul), samuti kahe nimetatu koosmõju.



Joonis 6.1 Kontaktjõud kontakti algusest kuni esmase purunemiseni, resultantjõud, erinevate elemendi suurustega, vasakul $L_{oc}=L_e$, paremal $L_{oc}=0,2$ m

Läbistussügavus (*overclosure*) mõjutab otseselt painde arengu kiirust. Väiksema L_{oc} väärtuse juures paindub materjal kiiremini ning puruneb varem. Suurem läbistussügavus omab ka (mõneti sarnaselt elemendi suuruse vähendamisele) tasandavat mõju kontaktjõududele, samas väiksema väärtuse korral koosneb graafik teravatest üksteisest eraldatud impulssidest. See parameeter omab mõningast mõju ka kontaktjõu maksimumidele, milles tähendati L_{oc} kasvades teatavat tõusu. Kuigi teoreetilisest osast ning olemasolevatest allikatest lähtuvalt otsustati esialgu kasutada töös läbistussügavust, mis on võrdne elemendi suurusega, selgub tulemustest, et kõnealuse parameetri defineerimine vajab edasist uuringut.

Läbistussügavust on küll mõnedes allikates lühidalt käsitletud, kuid selle määramiseks konkreetseid meetodeid või asjakohaseid viiteid ei ole. Jeon & Kim kasutasid oma simulatsioonides jääd paksusega 0,33 m, elemendi suurust 0,3 m ning läbistussügavust 0,4 m. Antud juhul on tegu pigem autori poolt katsete käigus tuletatud väärtusega ning otseselt sellel teemal töös peatunud ei ole, kuigi varasemalt on soovitatud kriitilise läbistuse seadmine võrdseks elemendi suurusega. See aga ei rahulda väiksemate elementidega teostatud simulatsioonide vajadusi, sest muudab jää käitumist.

Katsest vertikaalse konstruktsiooniga selgus ka, et elementide paiknemine ja kuju omavad mõju jää purunemisele. Kolmnurkprismadest elementide püstasetusega (joon

5.18, b) kasvas kontaktjõud kiiremini ning purunemine toimus varem, võrreldes „lamava“ asetusega. Samuti oli purunemine järkjärguline ja ühtlasem, võrreldes viimasega, kus toimus nõ plahvatuslik elementide erosioon. Kuna püstasetus võimaldab ka paremat radiaal- ja ringpragunemise simuleerimist jääplaadis, soovitatakse selle asetuse kasutamist edaspidises töös.

6.2 Edasine töö

Käesolevas töös uuriti ning tuvastati erinevate parameetrite mõjusid jää ja konstruktsiooni vastasmõju mudeli toimimisele. Siiski eeldab mudelite jätkuv arendamine edasisi katseid ja uurimustööd.

Kõige enam vajab autori hinnangul uurimist rõhu-läbistuse temaatika ning läbistussügavuse määramine mudelis. Hetkel puudub konkreetne alus läbistussügavuse määramiseks, peale väljakujunenud praktika ja ratsionaalse oletuse. Senine praktika on kriitilise läbistuse seadmine võrdseks elemendi suurusega. See ei rahulda jää ja konstruktsiooni vastasmõju modelleerimise vajadusi, sest muutes koos elemendi suurusega läbistussügavust, muutub jää käitumine. Eeldusel, et koos arvutusmahu kasvuga tulevikus muutuvad elemendid väiksemaks, tuleb leida adekvaatne meetod läbistussügavuse määramiseks.

Välja saab pakkuda läbistussügavuse defineerimist jää paksuse kaudu, kas lihtsa protsentarvutuse või keerukama valemi abil. Kuna konstruktsiooni läbistus jää sisse jäljendab lokaalset survepurunemist, on selle määramiseks vaja kõigepealt vaadelda jää käitumist *in situ* või eksperimentaalse katse tingimustes. Nii on võimalik mõõta ära lokaalse survepurunemise ulatus kontaktpinna ümbruses jää murdumise hetkel, ning ka jää painde ja kontaktjõu kasvu kiirus. Saadud andmete taustal on võimalik luua LEM mudel, kus läbistussügavus on defineeritud seoses jää paksusega ning katsetulemusi võrreldud eksperimentaalsete andmetega.

Lisaks ei võimalda käesolev mudel pikemaid simulatsioone konstruktsiooni kaldenurga 0° juures, kui soovitakse vaadelda jää esmasele purunemisele järgnevaid protsesse. Selleks on vaja leida efektiivsem meetod jää liikumise tõkestamiseks või modelleerida laia jääplaadi kokkupõrge kolmemõõtmelise konstruktsiooniga. On tõenäoline, et lisaks vertikaalsele konstruktsioonile võib käesoleva mudeli esialgse seadistuse rakendamisel esineda komplikatsioone ka teiste väiksemate φ väärtuste juures, näiteks vahemikus 1° - 10° . Vertikaalse konstruktsiooni käsitlemisel võib lahendusena välja pakkuda püstise

silindri kasutamist ning kaldpinna simuleerimist koonusega. Sellisel juhul saab kasutada laia jääplaati, mille tagumise tahu pind ületab oluliselt kontaktpinda ning võimaldab tavapärase liikumiskiirangu kehtestamist kõnealusele tahule.

Käesoleva töö tulemuste põhjal on soovitatud edasistes mudelites elemendi suuruse $L_e \leq 0,1$ m kasutamine ning kiiljate elementide puhul „püstine“ asetus (joon 5.18, b). Töö koostamisel on püütud võimalikult detailselt kirjeldada ka mudeli loomise protsessi, eesmärgiga kiirendada edasiste uuringute ettevalmistavat osa.

7 KOKKUVÕTE

Käesolev töö uurib jää ja konstruktsiooni vastasmõju, mille tarbeks loodi lõplike elementide meetodil põhinev mudel ning rakendati seda korduvates simulatsioonides eesmärgiga tuvastada erinevate parameetrite mõju katsetulemustele.

Töös vaadeldi jää purunemise teoreetilisi aluseid, mis kohandati jäätalast ja jäigast tasapinnast koosnevale Abaqus LEA tarkvaras loodud mudelile. Jää materjali modelleerimisel kombineeriti Drucker-Prageri materjali mudelit, kahjustumisel põhinevat elementide erosiooni ning progresseeruvat purunemist kahjuindeksi näol. Lokaalne surve tingitud purunemine modelleeriti kasutades surve-läbistuse suhet. Jää materjalomaduste valikul tugineti olemasolevatele allikatele ning eksperimentaalsetel andmetel põhineva nelja punkti katse kordamisele. Esialgse elemendi suurusena kasutati 0,2 m küljepikkusega viistahukaid (kiil).

Töös viidi läbi hulk simulatsioone, mille käigus loodi kokkupõrge 0,6 m paksuse jäätala ja tasapinna vahel kaldenurgaga φ , kiirusel 0,3 m/s. Kokkupõrke käigus avalduvad jõud ning liikumised salvestati, neid uuriti ja võrreldi. Töös analüüsiti selliste parameetrite mõju, nagu konstruktsiooni kaldenurk, elemendi suurus, läbistussügavus ja elementide paiknemine.

Katsetati kaldenurkadega 30° ja 0°. Esimesel juhul mõõdeti maksimaalseks surve- ja paindejõuks 8410 N ja 3686 N vastavalt ning ligilähedaselt sarnases suhtes olid need jõud kogu graafiku ulatuses. Teisel juhul langes vertikaal(painde)komponent nulli lähedale ning survejõudu mõjutasid läbistussügavus ja elementide paiknemine.

30° seadistust testiti kolme erineva elemendi suurusega: 0,2 m, 0,1 m ja 0,05 m. Väiksemate elemendi suuruste juures langes purunemiskohtade arv talas 3-st 1-ni. Samuti leidis aset kontaktjõu kõikumiste tasandumine. Maksimaalne kontakt-resultantjõud langes 8997 N juurest 6984 N peale. Need katsed viidi läbi kõigepealt läbistussügavusega, mis võrdus elemendi suurusega, ning seejärel uuesti konstantse läbistussügavusega 0,2 m. Viimasel juhul saadi realistlikum tulemus, samas kui esimesel juhul tõusis kontaktjõud kiiremini ja purunemine toimus varem.

Sama seadistust testiti ka elemendi suuruse 0,2 m juures erinevate läbistussügavuse väärtustega: 0,4 m, 0,2 m ja 0,1 m. Kõrgemate läbistussügavuse väärtuste juures saavutati pikem painde kestus koos hilisema purunemisega. Samuti vähenesid

kõikumised kontaktjõududes. 0,1 m juures koosnes jõu graafik teravatest eraldatud impulssidest.

Läbistussügavuse mõju uuriti kaldenurga 0° juures elemendi suurusega 0,1 m. Siin kasutati läbistussügavusi 0,2 m, 0,1 m ja 0,05 m. See muutis oluliselt kontaktjõu kasvu kiirust ning purunemise aega. Läbistussügavuse vähendamisega saavutati kiirem kontaktjõu kasv ja varasem jää purunemine. Need katsed viidi läbi kahe erineva elementide paigutuse juures: pikali (esialgne) ja püstine kolmnurkprisma. Viimasel juhul saavutati kiirem kasv kontaktjõududes koos varasema purunemisega, mille põhjuseks võis osaliselt olla elemendi pikkuse hälbimine kontaktpinna läheduses.

Edasiseks tööks soovitati põhjalikumat surve-läbistuse suhte ja läbistussügavuse teema uurimist. Pakuti välja läbistussügavuse defineerimist (elemendi suuruse asemel) seoses jää paksusega. Selle seose täpsema defineerimise huvides teadvustati ka vajadust asjakohaste eksperimentaalsete andmete järele.

Lisaks eeldab pikemate simulatsioonide teostamine vertikaalse konstruktsiooniga kas alternatiivsel viisil piirtingimuste seadmist või teistsuguse mudeli kasutamist, viimasel juhul laia jääplaadiga. Kõigil juhtudel soovitati maksimaalse elemendi suuruse 0,1 m kasutamist koos püstise kolmnurkprisma paigutusega.

SUMMARY

This thesis investigates ice-structure interaction by the application of a Finite Element Method based model in a series of simulations to identify the impact of different parameters on test results.

The theoretical background of ice failure mechanics was examined and applied to a model consisting of an ice beam and a rigid flat surface structure created using Abaqus FEA software. The ice material was modelled by combination of Drucker-Prager plasticity, damage-based element erosion, and damage mechanics using a damage index. The local crushing failure of ice was modelled using a pressure-penetration relationship. The material properties of ice were chosen based on existing sources and tested through application to a four point bending test based on experimental data. An initial 0.2 m mesh size was used with pentahedron (wedge) shaped elements.

In a series of simulations the structure with an incline angle φ was moved into a 0.6 m thick ice beam at a speed of 0.3 m/s and the resulting forces and movements were recorded, examined and compared. The impact of parameters such as incline angle, element size, overclosure and element positioning was analysed.

The incline angles of 30° and 0° were tested. In case of the former the maximum horizontal and vertical contact forces of 8410 N and 3686 N were measured respectively, with a roughly similar ratio appearing throughout the graphs. In case of the latter, the vertical component dropped to near zero with the horizontal maximum dependant on the value of overclosure and element positioning.

The 30° configuration was tested using three different mesh sizes of 0.2 m, 0.1 m and 0.05 m. The smaller mesh sizes showed a decrease in longitudinal failure points from 3 to 1, and also displayed an evening of contact force fluctuation. The maximum resultant contact force decreased from 8997 N to 6984 N. These tests were performed first with an overclosure equal to element size and repeated later with a constant of 0,2 m. The latter gave a more realistic result, whereas in case of the former the contact forces showed a sharper increase with an earlier ice failure.

The same configuration was also tested using an element size of 0.2 m and overclosure values of 0.4 m, 0.2 m and 0.1 m. Higher values of overclosure resulted in longer bending curve and delayed failure of ice material, along with an evening of contact force fluctuation, whereas setting it to 0.1 m resulted in sharp isolated peaks.

The effect of overclosure was also investigated in a 0° configuration using an element size of 0.1 m. In this case overclosure values of 0.2 m, 0.1 m and 0.05 m were used. This drastically changed the elevation angle in contact forces along with the time of failure. By decreasing overclosure a more rapid increase in contact force with earlier failure was achieved. These tests were run under two different element configurations: a reclined (standard) and an upright triangular prism. The latter displayed a sharper increase in contact force with an earlier failure, some of which could also be attributed to differences in element length around the contact area.

For future work a more detailed examination of the pressure-penetration relationship and overclosure was recommended. Setting the value of overclosure based on ice thickness rather than element size was proposed. Developing this approach would also benefit from the addition of new experimental data.

In addition an alternative application of boundary conditions or use of a different model would be required for prolonged simulations with vertical structures, using a wide ice sheet in case of the latter. In general a maximal element size of 0.1 m in an upright triangular prism configuration was recommended.

KASUTATUD ALLIKATE LOETELU

- Budzik, P. (2009). Arctic Oil and Natural Gas Potential. U.S. Energy Information Administration.
- DNV. (2014). DNV–OS–J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures.
- Ehlers, S., & Kujala, P. (2014). Optimization-based material parameter identification for the numerical simulation of sea ice in four-point bending. *J Engineering for the Maritime Environment*, Vol 228(1) 70-80.
- Hydrographic Office of the Polish Navy. (kuupäev puudub). chart No. 1501. Hydrographic Office of the Polish Navy.
- Jeon, S., & Kim, Y. (2021). Numerical simulation of level ice–structure interaction using damage-based erosion model. *J Ocean Engineering*.
- Jevrejeva, S., & Leppäranta, M. (2002). Ice conditions along the Estonian coast in a statistical view. (lk 241-267). *Nordic Hydrol*. 33 (3).
- Kujala, P. (1994). On the Statistics on Ice Loads on Ship Hull in the Baltic. Helsinki University of Technology.
- Kujala, P., Riska, K., & Varsta, P. (1990). Results from in situ four point bending tests with Baltic Sea ice. *Proceedings of IAHR Symposium on Ice Problems* (lk 261-278). Helsinki: IAHR.
- Leppäranta, M. (1981). An ice drift model for the Baltic Sea. (lk 33,583–596). *Tellus*.
- Leppäranta, M., & Seinä, A. (1985). Freezing, maximum annual ice thickness and breakup of ice on the Finnish coast during 1830–1984. (lk 87-104). *Geophysica*, Vol. 21.
- Lubbad, R., & Løset, S. (2011). A numerical model for real-time simulation of ship–ice interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 65 (2), 111-127 .
- Mardiste, H. (1997). Kuidas Läänemerel tekib ja kaob jää. *Eesti Loodus*, (3): 168-170.
- Mardiste, H., & Vahter, R. (2008/12). Vähima jääkattega talv Läänemerel. *Eesti Loodus*.
- Rosenthal, R. (2012). Jääkoormuse arvutamine koonusekujulise tuulegeneraatori vundamendile numbrilise meetodiga. Tallinna Tehnikaülikool.
- Schulson, E. M. (1999). The Structure and Mechanical Behavior of Ice. Hanover: Thayer School of Engineering.
- Schulson, E. M. (2001). Brittle failure of ice. *Engineering Fracture Mechanics* 68 (17-18), 1839-1887.
- Shi, W., Tan, X., Zhou, L., Ning, D., & Karimirad, M. (2018). Investigation on Ice Loads for Offshore Wind Turbine in Varying Ice Conditions. Queen's University Belfast.
- Soa, T. (2011). Numerical simulations of a sea ice beam in four-point bending. Espoo: Aalto University.
- Sooäär, J. (2006). Eesti rannikumere räärežiimi ajalis-ruumiline muutlikkus ajavahemikul 1950/51-2004/05. Tartu Ülikool.
- Tabri, K., Tõns, T., Suominen, M., & Kõrgesaar, M. (2022). Ice-Induced Loads on Offshore Wind Turbines in the Baltic Sea. Hamburg: ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- Uotila, J. (2001). Observed and modeled sea-ice drift response to wind forcing in the northern Baltic Sea. (lk 53A, 112-128). *Tellus*.
- Xu, Y., Hu, Z., Ringsberg, J. W., & Chen, G. (2019). Nonlinear viscoelastic-plastic material modelling for the behaviour of ice in ice-structure interactions. *J Ocean Engineering*.
- Zhang, N., Zheng, X., & Ma, Q. (2017). Updated Smoothed Particle Hydrodynamics for Simulating Bending and Compression Failure Progress of Ice. *Water*, 9(11), 882.