

Bruddseighet versus slagseighet for konstruksjonsstål.

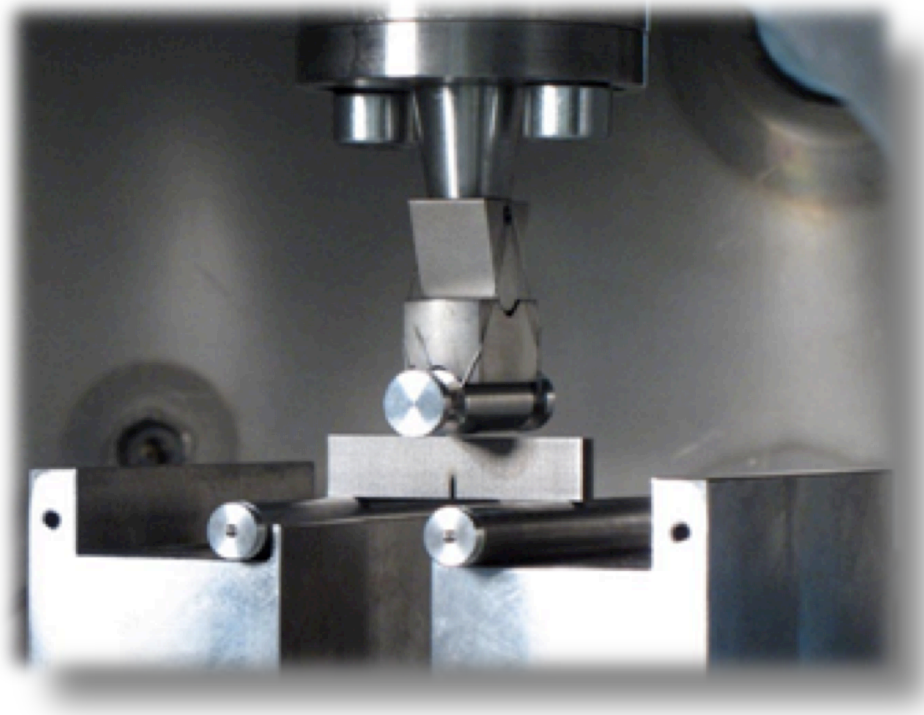
Fracture toughness versus Charpy Impact Energy for structural steel.

Simon Strande

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITTENSKAP
INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2013



Bruddseighet versus slagseighet for konstruksjonsstål



[1]

av
Simon Strande



Gradsoppgave
Maskin- prosess og produktutvikling,
IMT/UMB, 2013

Universitetet for miljø- og biovitenskap
Institutt for matematiske realfag og teknologi



FORORD

Dette prosjektet er gjennomført som en del av masterprogrammet i maskin, prosess og produktutvikling ved Institutt for matematiske realfag og teknologi ved UMB. Prosjektet er gjennomført våsemesteret 2013 med et omfang på 30 studiepoeng. Veileder under arbeidet har vært førsteamanuensis Geir Terjesen.

Oppgaven har vært å sette seg inn i og prøve ut de ulike estimeringsteknikker som finnes mellom bruddseighet og slagseighet for konstruksjonsstål under forskjellige temperaturforhold. Disse har blitt analysert og studert for så å lage en oversiktlig rapport som gir et relevant og oversiktlig bilde av de estimeringsteknikker som foreligger for å finne bruddseighet ut fra slagseighet. Deretter har det blitt gjennomført eksempler som viser bruken og anvendelsen av formelverket. I tillegg til dette har jeg gjennomført praktisk slagseighetstesting på material laboratoriet ved Universitetet.

Jeg valgte denne oppgaven fordi den var annerledes enn de fleste andre oppgavene jeg har utført tidligere. Gjennom studiet har de fleste prosjekter dreid seg om å utvikle nye produkter og gjennomføre beregningsanalyser. Denne gangen dreide oppgaven seg om å danne seg oversikt over og få et relevant bilde av de estimeringsteknikker som finnes mellom slagseighet og bruddseighet. Oppgaven har nærmest vært et litteraturstudium. Det har vært utrolig lærerikt å ha fått muligheten til å sette meg inn i noe helt nytt. Dermed har jeg hatt en bratt lærekurve gjennom dette semesteret. Jeg har stor interesse for materiallære og derfor virket akkurat dette temaet veldig aktuelt for meg.

Oppfølgingen fra maskinseksjonen ved instituttet har vært meget god, og en naturlig takk rettes derfor til overingeniør Bjørn Brenna. Jeg vil spesielt takke min hovedveileder førsteamanuensis Geir Terjesen for solid tilbakemelding og rettleiding gjennom hele prosessen.

Jeg vil også takke familie og venner som har vært oppmuntrende og gitt meg støtte, ikke bare gjennom denne oppgaven, men gjennom hele studiet.

Sometimes all we need is a new perspective on an old problem
– Coduto, Donald P.

Ås, den 15.mai 2013

Simon Strande

15.mai 2013

SAMMENDRAG

I skade tolerant design (Damage Tolerant Design) er det nødvendig å kjenne til bruddseigheten til materialet for å gjøre bruddmekaniske vurderinger. Det er svært kostbart å utføre bruddseighetstesting, det er derfor viktig å kunne estimere bruddseigheten når vi kjenner slagseigheten. Bruddseigheten til en legering vil blant annet variere med tykkelse og temperatur. Dette medfører behov for bruddseighetsdata under forskjellige temperatur og tykkelsesforhold. Årsaken til at bruddseighetstesting er kostbart er blant annet fordi det må lages en utmattingsprekk i prøvestavene og at testmaskin, utstyr og kompetanse er kostbart. Slagseighetstesting er langt rimeligere fordi prøvestaven er enklere og ikke har utmattingsprekk.

Hovedfokuset gjennom oppgaven har vært på konstruksjonsstål. Det som danner bakgrunn for denne masteroppgaven er at det finnes estimeringsteknikker, altså formler som korrelerer mellom slagseighet og bruddseighet. Det er disse formlene som danner grunnlaget for denne masteroppgaven.

Målet med oppgaven er å lage en fullstendig og oversiktlig rapport over de ulike estimeringsteknikker som finnes med hovedvekt på de fra den Britiske Standarden BS 7910 for å finne et estimat på bruddseighet ut fra slagseighet.

Rapporten har vært et litteraturstudium for å studere foreslåtte formler mellom bruddseighet og slagseighet. Rapporten innbefatter seks case som er praktiske eksempler, som viser bruken av formelverket. Det ble også gjennomført praktisk slagseighetstesting ved Universitetets material laboratorium.

Erfaringer ved bruk av formelverket er at det er omfattende og komplisert å sette seg inn i. Å tilegne seg en fullstendig oversikt er krevende. Organisasjonen The Welding Institute har en omfattende oversikts rapport som stadfester over 30 korrelasjoner, men denne rapporten er ikke allment tilgjengelig. Har vært i kontakt med DNV og fått tilgang til dokumenter som omtaler bruddseighet i Arktiske områder.

Ofte så er situasjonen slik at den som skal bruke Charpy slagseighetsverdier til videre bruddmekanisk analyse kun har én slagseighetsverdi oppgitt ved én gitt temperatur. Dette sier oss veldig lite om materialeegenskapene, og gjør det vanskelig for den ingeniøren som ønsker å benytte seg av formlene. Derfor er det essensielt at det er en rekke korrelasjoner tilgjengelig for brukeren. Utfordringene ligger i å velge den riktige. Selv om mange av de estimeringsteknikkene som eksisterer har det samme matematiske uttrykket, og konsekvent gir sammenlignbare resultater, er problemet at det finnes så utallig mange forskjellige varianter av disse formlene. Det viktige ved valg av korrelasjonsmetoder er bestemt av de verdiene man har tilgjengelig av Charpy slagseighetsverdier. Andre potensielle problemer er produksjonsendringer for konstruksjonsstål, nyere stål har bedre materialeegenskaper enn eldre. For å opparbeide tillitt til bruken av korrelasjonsformlene er man avhengig av videre forskning, valideringer og statistiske analyser.

Med tanke på fremtidig oljeutvinning i Lofoten og Arktis er kunnskap rundt bruddseighet og hvordan man kan estimere bruddseighet ut fra slagseighet veldig interessant, og da spesielt for Norge og oljeindustrien.



ABSTRACT

In Damage Tolerant Design it is necessary to have knowledge about the fracture toughness of a material for making fracture mechanics assessments. It is very expensive to perform fracture toughness tests. This is why it is important being capable of giving an estimate of the fracture toughness when we have knowledge about the Charpy impact toughness. The fracture toughness for a material will vary with thickness and temperature. This will necessitate the fracture toughness data under different temperature and thickness conditions. The main reason why fracture toughness testing is expensive is partly because the material must contain a fatigue crack in the test specimen and the test machine, equipment and expertise is highly expensive. Charpy impact testing is much cheaper because the test specimen is easier to manufacture and does not have to contain a fatigue crack. The main focus of this thesis has been on structural steel. The basis for this thesis is that there exists correlation techniques, ie formulas that correlate between Charpy impact energy and fracture toughness. These formulas are the main objective for this thesis.

The aim of this thesis is to create a comprehensive and transparent report of the various estimation techniques that exists with a main focus on the formulas from the British Standard BS 7910 to find an estimate of the fracture toughness from Charpy impact energy.

The thesis has been a literature study to investigate the proposed formulas between fracture toughness and Charpy impact energy. The report includes six cases that are practical examples that demonstrate the use of the formulas. A practical Charpy impact test has also been conducted at the University.

It was demanding to acquire a complete overview of the entire topic. Organizations such as The Welding Institute contain a comprehensive report that gives an overview of 30 different correlations. Unfortunately this report is not available for the public. However, contact with DNV gave access to some interesting papers discussing fracture toughness in the Arctic regions.

Often the situation is such that the person who wants to use the Charpy impact values for further fracture mechanics analysis only has one format of this toughness. This tells us very little about the material properties. This creates difficulties for engineers who want to apply the use of these formulas. Therefore it is essential that there are a number of correlations available to the user. One of the challenges lies in choosing the correct one. Although many of the estimation techniques that exist have the same mathematical expression, and give comparable results, the problem is that there are so many variations of these formulas to choose from. The selection of a correlation method often falls on the Charpy values provided in advance. Other potential problems are production changes for structural steel, new developed steel having better material properties than older. To gain confidence in the use of correlation techniques we are depending on further research, validations and statistical analyses.

Future oil exploration in Northern Norway and in the Arctic require knowledge about fracture toughness and how to determine this from Charpy impact energy. This is especially interesting for Norway and the oil and gas industry.

INNHALDSFORTEGNELSE

1. INNLEDNING	5
1.1. BAKGRUNN.....	7
1.2. PROBLEMSTILLINGER	9
1.3. MÅLSETTINGER OG BEGRENSNINGER	10
1.3.1. <i>Hovedmål:</i>	10
1.3.2. <i>Delmål:</i>	10
1.3.3. <i>Begrensninger:</i>	10
1.4. KVALITETSSIKRING	10
1.4.1. <i>Kvalitetssikring rapport:</i>	10
1.4.2. <i>Kvalitetssikring produkt:</i>	10
1.5. LØSNINGSVERKTØY	11
1.5.1. <i>Prosjektstyring</i>	11
1.5.2. <i>Målinger</i>	11
1.5.3. <i>Tekstbehandling</i>	11
1.5.4. <i>Dataverktøy</i>	11
1.6. SYMBOLER.....	12
1.7. PROSJEKTPLANLEGGING	13
1.8. TERMINOLOGI.....	14
1.9. FORMLER.....	14
1.9.1. <i>Nedre grense korrelasjon</i>	14
1.9.2. <i>Omslagsområdet (The Master Curve Approach)</i>	15
1.9.3. <i>Øvre grense korrelasjon</i>	15
1.9.4. <i>Andre nyttige formler</i>	15
2. BESKRIVELSER	17
2.1. KRAVSPESIFIKASJONER.....	17
2.2. KONSTRUKSJONSSTÅL.....	17
2.3. BRUDD KONTROLL.....	18
2.3.1. <i>Skade tolerant design</i>	18
2.3.2. <i>NDT-metode</i>	19
2.4. SLAGSEIGHET	20
2.5. BRUDDSEIGHET	23
2.6. SLAGSEIGHET VERSUS BRUDDSEIGHET	27
2.7. SLAGSEIGHETSTESTING	27
2.7.1. <i>Charpy Impact Test</i>	27
2.7.2. <i>Izod test</i>	29
2.8. BRUDDSEIGHETSTESTING	30
2.8.1. <i>Bruddseighets standarder</i>	31
2.8.2. <i>Crack Tip Opening Displacement (CTOD)</i>	32
2.8.3. <i>K_{1C} testing</i>	35
2.9. KLASSIFISERING AV KONSTRUKSJONSSTÅL	37
2.10. STANDARDISERING	40
3. CHARPY - BRUDDSEIGHETS KORRELASJONER	41
3.1. INDUSTRIELLE PROBLEMER OG UTFORDRINGER.....	41
3.2. ULIKE TYPER CHARPY DATA.....	43
3.3. NÅVÆRENDE STATUS OG TILNÆRMINGER	44
3.4. POTENSIELLE PROBLEMER MED KORRELASJONENE.....	45
3.4.1. <i>Forskjeller i testmetoder</i>	45
3.4.2. <i>Produksjons endringer for konstruksjonsstål</i>	46
3.4.3. <i>Fasong på omslagskurven</i>	47

3.4.4.	<i>Estimering av Charpy og bruddseighets verdier ved ulike temperaturer</i>	47
3.4.5.	<i>Forholdet mellom parameterne til bruddseighet</i>	48
3.4.6.	<i>Tykkelseeffekt</i>	48
3.4.7.	<i>Statistiske analyser</i>	48
3.5.	INDUSTRIELLE KRAV	49
3.6.	EUROKODE 3	49
3.7.	ARKTISKE STRØK	50
3.8.	FREMTIDIG ARBEID	50
4.	UTVALG AV KORRELASJONER	51
4.1.	VALG AV KORRELASJON	52
5.	ESTIMERINGSTEKNIKKER	54
5.1.	NEDRE GRENSE KORRELASJON	54
5.2.	STATISTISK METODE FOR OMSLAGSOMRÅDE.....	55
5.2.1	<i>Utledning av "The Master Curve Approach"</i>	58
5.3.	ØVRE GRENSE KORRELASJON	63
6.	TEMPERATUR VED CHARPY 27/28 JOULES	68
7.	K-VERDI TILNÆRMING	70
7.1.	DEFINISJON AV K_{MAT}	70
7.2.	FORHOLDET MELLOM K, J OG CTOD BRUDDSEIGHET	70
8.	PÅVIRKNING AV TØYNING	72
9.	HÅNDTERING AV SUB-SIZE CHARPY VERDIER	75
10.	ANDRE ESTIMERINGSTEKNIKKER	77
10.1.	GENERISKE KORRELASJONER.....	77
10.2.	ESTIMERINGSTEKNIKKER FOR DET NEDRE GRENSE OMRÅDET	78
10.2.1.	<i>Chaudhuri:</i>	78
10.2.2.	<i>Girenko:</i>	79
10.2.3.	<i>Imai:</i>	79
10.2.4.	<i>Logan:</i>	79
10.2.5.	<i>Sailors & Corton:</i>	79
10.2.6.	<i>Barsom, Rolfe & Novak:</i>	79
10.2.7.	<i>Exxon Fitness for Service Guide:</i>	80
10.2.8.	<i>SINTAP:</i>	80
10.2.9.	<i>Roberts & Newton:</i>	80
10.3.	SAMMENLIGNING AV DE ULIKE NEDRE GRENSE KORRELASJONENE.....	81
10.4.	ESTIMERINGSTEKNIKKER FOR DET ØVRE GRENSE OMRÅDET.....	82
10.4.1.	<i>Ito:</i>	82
10.4.2.	<i>Norris:</i>	83
10.4.3.	<i>Priest:</i>	83
10.4.4.	<i>Thorby:</i>	83
10.4.5.	<i>Witt:</i>	83
10.4.6.	<i>BS PD 6493-2:</i>	83
10.5.	SAMMENLIGNING AV DE ULIKE ØVRE GRENSE KORRELASJONENE	84
10.6.	KORRELASJONER SOM INVOLVERER SKIFT I TEMPERATUREN:.....	85
10.6.1.	<i>ASME-PVRC:</i>	85
10.6.2.	<i>BS PD 6493-1:</i>	86
10.6.3.	<i>Barsom:</i>	86
10.6.4.	<i>Matsumoto:</i>	86
10.6.5.	<i>Oda:</i>	86
10.6.6.	<i>Braid:</i>	87

11. CASER.....	88
11.1. BAKGRUNN.....	88
11.2. CASE 1: BRUK AV ESTIMERINGSTEKNIKKER.....	88
11.2.1. Bakgrunn:	88
11.2.2. Antagelser:.....	88
11.2.3. Del 1: Nedre grense område.....	89
11.2.4. Del 2: Omslagsområde / The Master Curve Approach	89
11.2.5. Del 3: Øvre grense område.....	90
11.2.6. Del 4: Sammenligning.....	91
11.3. CASE 2: ULIKE CHARPY KURVER MED SPESIFISERT TYKKELSE.....	93
11.3.1. Bakgrunn:	93
11.3.2. Del 1: 355EMZ, B = 50mm.....	95
11.3.3. Del 2: 450EMZ, B = 50mm.....	97
11.3.4. Del 3: StE690, B = 40mm.....	100
11.3.5. Del 4: StE690, B = 55mm.....	103
11.3.6. Del 5: Sammenligning.....	106
11.3.7. Del 6: Bruk av øvre grense korrelasjon med flytegrense.....	107
11.3.8. Del 6.1: Sammenligning	111
11.4. CASE 3: KONVERTERE CTOD TIL K_{MAT}	112
11.4.1. Bakgrunn:	112
11.4.2. Antagelser:.....	113
11.4.3. Del 1: Lese av data.....	113
11.4.4. Del 2: Estimere bruddseigheten K_{mat} for de tre konstruksjonsstålene.....	114
11.4.5. Del 3: Resterende utregninger og sammenligning.....	116
11.5. CASE 4: ANVENDELSE AV KORRELASJONSMETODER PÅ A36 STÅL.....	118
11.5.1. Bakgrunn.....	118
11.5.2. Antagelser	118
11.5.3. Del 1: Estimerte K_{mat} verdier fra slagseigheter.....	118
11.5.4. Del 2: CTOD og plan spenning	122
11.5.5. Del 3: Tykkelse versus bruddseighet.....	122
11.6. CASE 5: KONVERTERE CTOD VERDIER TIL K_{MAT}	124
11.6.1. Bakgrunn:	124
11.6.2. Antagelser:.....	126
11.6.3. Utregninger:.....	126
11.7. CASE 6: NÅR MAN BARE HAR ÉN VERDI.....	130
11.7.1. Bakgrunn:	130
11.7.2. Del 1: Estimere bruddseigheten.....	130
11.7.3. Del 2: CTOD ved plan spenning	131
11.8. PRAKTISK TESTING PÅ LAB	132
11.8.1. Bakgrunn.....	132
11.8.2. Måleutstyr.....	133
11.8.3. Testresultater	136
11.8.4. Kommentarer til forsøkene:	139
11.8.5. Estimering av bruddseigheten.....	141
11.9. CASEANALYSE.....	142
12. DISKUSJON OG PROSESSEVALUERING	143
12.1. DISKUSJON	143
12.1.1. Bruddseighetstesting.....	143
12.1.2. Caser	143
12.1.3. Praktisk testing på lab.....	143
12.1.4. Kostnadsbesparelser	144
12.1.5. Materialprøvedata	144
12.2. FORBEDRINGER.....	144



13. KONKLUSJON	145
13.1. ANBEFALINGER	146
13.2. VIDERE ARBEID	146
14. LITTERATURREFERANSER	147
14.1 SKRIFTLIGE KILDER:.....	147
14.2. INTERNETTKILDER	149
15. VEDLEGG	151

1. INNLEDNING

Å foreta bruddmekaniske vurderinger blir bare mer og mer viktig i dagens moderne samfunn. Bruddmekanikk er en egen fagdisiplin innen forskning på materialer. Innen denne disiplinen ser man på hvordan brudd kan oppstå, og hvordan dette kan forhindres. Man ser da på konstruksjonsmaterialer som beheftes med sprekk lignende defekter. Det er slike defekter som ofte resulterer i brudd. Når defektens dybde og den nominelle spenning i selve konstruksjonen blir for stor, eller overstiger en viss størrelse oppstår det fare for brudd. Denne størrelsen er avhengig av materialets egenskaper og kalles materialets bruddseighet [2].

Generelt kan man si at man ønsker deformasjon før brudd. Dermed får vi et forvarsel på at noe vil skje og vi får muligheten til å avverge bruddet, eller muligheten til å komme oss i sikkerhet. Dersom en utmattingssprekk i en belastet maskindel vokser til kritisk størrelse vil bruddet skje med enorm hastighet, og vi har ingen mulighet til å avverge bruddet. Det er flere eksempler på slike brudd. Under andre verdenskrig inntraff flere sprøbrudd i sveiste skipsskrog. Det hendte at store skip ble brukket tvers av når de lå ved havn i stille vær. Store bruer har fått samme skjebne etter at en utmattingssprekk har fått vokse til kritisk størrelse. Fra 1950 og frem til i dag har man arbeidet mye med å forstå mekanismene i sprekkvekst og påfølgende brudd. Fagområdet blir kalt bruddmekanikk som kan gis følgende enkle definisjon [S.7]:

”Bruddmekanikk er vitenskapen som relaterer styrken til en sprukket komponent med materialets evne til å motstå sprekkvekst” [S.7].

Brudd har alltid vært et problem som samfunnet vårt har stått ovenfor. Det har forekommet utmattingbrudd i alt fra fjell til bein. Problemene rundt brudd og bruddmekanikk er antagelig mye større i dag enn det noen sinne har vært. Dette er på grunn av at i dagens komplekse og høyteknologiske verden er det rett og slett mye mer som kan gå galt. I dag stilles det blant annet krav til materialene om lavere vekt og større belastninger. Heldigvis på grunn av en enorm utvikling innen bruddmekanikk har man vært i stand til å forhindre fremtidige ulykker og katastrofer. Vår viten rundt hvordan et materiale svikter og vår evne til å forhindre dette blir stadig videreutviklet og forbedret.

Man kan si at det nesten alltid vil oppstå sprekker. Sprekker kan oppstå under produksjonen, og de kan utvikle seg videre over tid som følge av utmatting. Dermed kan sprekken vokse katastrofalt og føre til brudd. Bruddseigheten til materialer er derfor kritisk for å definere når en sprekk vil føre til brudd.

Årsaken til at bruddmekaniske vurderinger er blitt så viktig er fordi det har oppstått store og fatale ulykker opp gjennom tidene på grunn av for lite kunnskap på området. Derfor har bruddmekaniske undersøkelser blitt mer og mer viktig i den moderne verden. God bruddmekanisk analyse kan være med på å forhindre videre sprekkvekst og eventuelt faren for bruddmekanisk svikt.

Eksempler på ulykker som har oppstått gjennom tidene på grunn av bruddmekanisk svikt og utmatting er:

Aleksander Kielland ulykken:

Figur 1: Bildet viser hvor utmattingsbruddet skjedde på Aleksander Kielland plattformen i 1980. Denne ulykken er å regne som en av de største og mest fatale i Norges historie der 123 mennesker omkom [3].

Aloha ulykken:

Figur 2: Bildet viser Aloha Airlines ulykken hvor store deler av flyet ble revet av på grunn av sprekkdefekter. Flyulykken skjedde i 1988 [4].

Bakgrunnen for denne masteroppgaven er å øke kompetansen om skade tolerant design (Damage Tolerant Design) og kunnskapen til hvordan man kan estimere bruddseigheten til et materiale. Dette kan man gjøre ved å ha kjennskap til slagseigheten til materialet. Det betyr at man er i stand til å estimere bruddseigheten til et materiale uten å foreta svært kostbare og omfattende bruddmekaniske tester. Ved å ha kjennskap til slagseigheten til et materiale, som er en mye enklere og billigere metode er man i stand til å komme frem til estimater av bruddseigheten. Dette forenkler måten å komme frem til bruddseighetsverdier på, som man kan bruke

videre i bruddmekaniske analyser og innen skade tolerant design. Dette har enorm betydning for fagdisiplinen bruddmekanikk som helhet og vil kunne være enormt tids- og kostnadsbesparende.

1.1. Bakgrunn

I Skade Tolerant Design (Damage Tolerant Design) er det nødvendig å kjenne til bruddseigheten til materialet for å gjøre bruddmekaniske vurderinger. Det er svært kostbart å utføre bruddseighetstesting, det er derfor viktig å kunne estimere bruddseighetsdata når vi kjenner slagseigheten. Bruddseigheten til en legering vil blant annet variere med tykkelse og temperatur. Jeg vil hovedsakelig se på konstruksjonsstål. Dette medfører behov for bruddseighetsdata under forskjellige temperaturer og tykkelsesforhold. Årsaken til at bruddseighetstesting er kostbart er blant annet fordi det må lages en utmattingsprekk i prøvestavene og at testutstyret og kompetansen er avansert samt at det er tidkrevende å gjennomføre i praksis. Slagseighetstesting er langt rimeligere fordi prøvestaven er enklere å konstruere, blant annet fordi den ikke har utmattingsprekk og på grunn av at testutstyret og prosedyren er vesentlig enklere.

Det er viktig å stadfeste tidlig at hovedregelen tilsier at bruddmekanisk testing absolutt er å foretrekke. Da vil man få de mest korrekte verdiene for bruddseighet, ikke bare et estimat. Korrelasjoner vil kun gi et estimat på hva bruddseigheten er [S.2].

I mange situasjoner kan det være vanskelig å anslå bruddseigheten til et materiale. Det kan være mange årsaker til dette. Blant annet fordi man ikke har utstyr og kompetanse, det er ikke økonomisk forsvarlig eller at man ikke har materialet som trengs. Det er i slike tilfeller det er nødvendig å bruke empiriske korrelasjonsformler hvor man bruker slagseigheten for å få et estimat av bruddseigheten. Det finnes et utvalg av korrelasjoner man kan bruke avhengig av hvor på omslagskurven man er og hvilke Charpy slagseighetsverdier man har tilgjengelig.

I denne rapporten har jeg forsøkt å kartlegge og beskrive de ulike teknikkene som finnes for å estimere bruddseigheten. Siden det ikke finnes én eksakt formel eller én korrelasjon for hele omslagskurven for stål, er det flere korrelasjons tilnærminger og metoder. Disse korrelasjonsformlene deles inn i tre hovedgrupperinger, avhengig av hvor på omslagskurven man befinner seg. Kort oppsummert kan det sies at det er tre hovedgrupperinger, og disse er som følger:

1. Nedre grense korrelasjon for det sprø området (A lower bound correlation for lower shelf)
2. Statistisk metode for omslagsområdet (The Master Curve Approach)
3. En øvre grense korrelasjon for det seige området (A lower bound correlation for upper shelf)

Jeg har gjennom denne oppgaven tatt utgangspunkt i den Britiske rapporten "Determination of fracture toughness from Charpy Impact Energy: Procedure and validation" av A.C. Bannister". Mye av informasjonen presentert gjennom denne oppgaven er hentet fra denne rapporten.



Brite-Euram Project No.: BE95-1426
Contract No.: BRPR-CT95-0024
Task No.: 3
Sub-Task No.: 3.3
Date: 21/1/98
Contributing Organisations: British Steel, VTT,
and TWI
Document No.: SINTAP/BS/17

**STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT PROCEDURES
FOR EUROPEAN INDUSTRY**

SINTAP

SUB-TASK 3.3 REPORT: FINAL ISSUE

DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS FROM CHARPY IMPACT

ENERGY: PROCEDURE AND VALIDATION

Reported By: British Steel plc

Author: A.C. Bannister

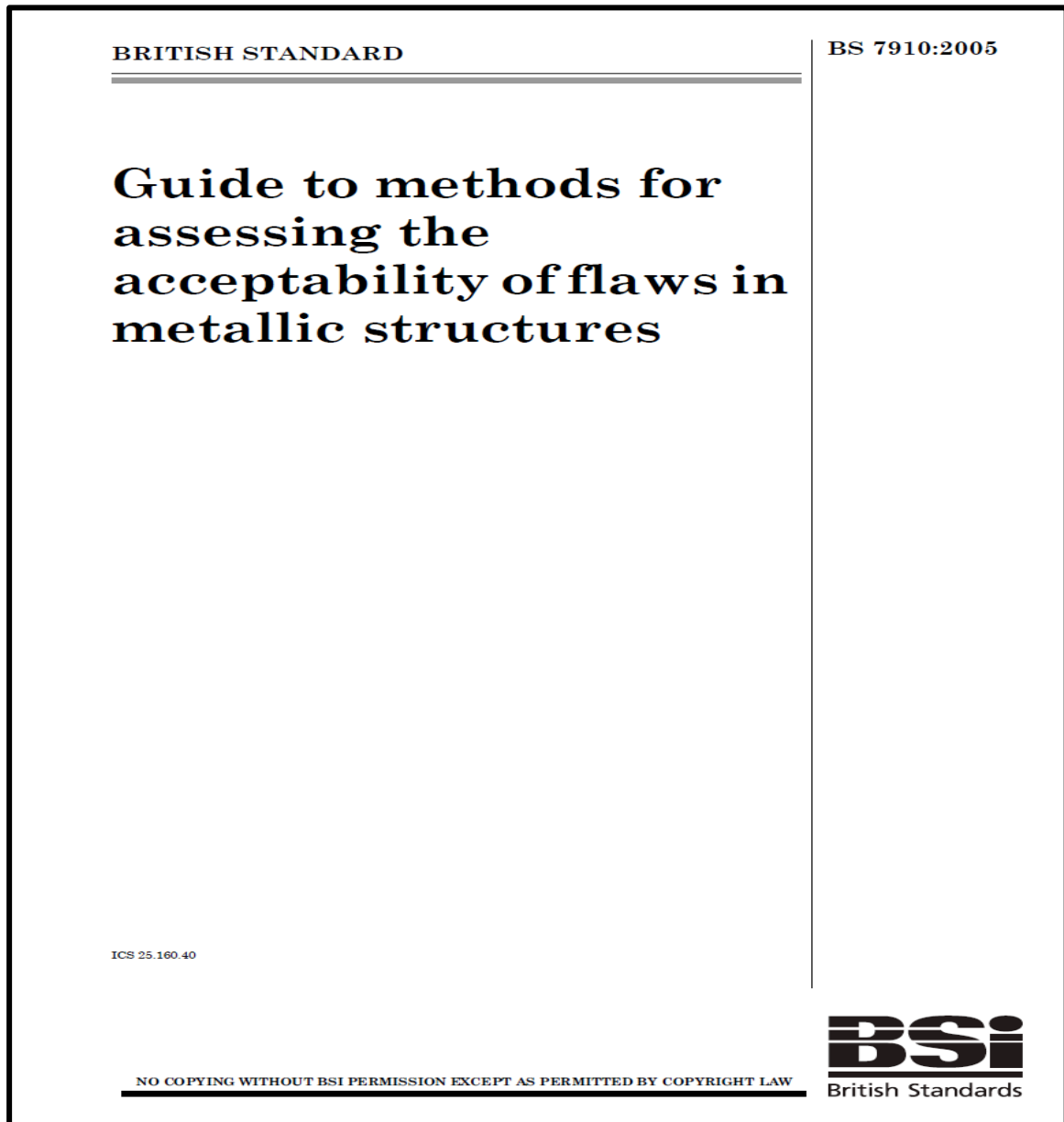
British Steel plc
Swinden Technology Centre
Moorgate
Rotherham S60 3AR
United Kingdom



Figur 3: Rapport skrevet av A.C. Bannister [S.2].

Denne rapporten gir en god oversikt over hvilke estimeringsteknikker som brukes i den Britiske Standarden BS 7910. Den inneholder også en rekke valideringer av de ulike teknikkene. Denne rapporten er basert på et prosjekt som heter SINTAP som står for ”Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry”.

Jeg har også tatt utgangspunkt i den Britiske Standarden BS 7910 som stadfester disse estimeringsteknikkene. Det er disse estimeringsteknikkene som er stadfestet her som jeg har lagt mest hovedvekt på gjennom hele denne rapporten.



Figur 4: Den Britiske Standarden BS 7910:2005 – Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures [S.6].

1.2. Problemstillinger

- Få tilstrekkelig oversikt over eksisterende formler mellom bruddseighet og slagseighet for konstruksjonsstål under forskjellige temperaturforhold med utgangspunkt i den Britiske Standarden BS 7910.
- Studere eventuelle andre estimeringsteknikker som finnes – i tillegg til de teknikkene presentert i BS 7910.
- Fremlegge en oversiktlig rapport over de ulike estimeringsteknikkene fra BS 7910 og SINTAP samt presentere andre relevante teknikker som finnes.
- Undersøke om det finnes annen tilgjengelig litteratur eller informasjon som er av betydning for oppgaven.
- Lage eksempler (caser) som viser bruken av formelverket – med hovedfokus på formlene fra den Britiske Standarden BS 7910.
- Praktisk slagseighetstesting på laboratoriet og anvendelse av resultatene.

1.3. Målsettinger og begrensninger

1.3.1. Hovedmål:

Lage en fullstendig og oversiktlig rapport over de ulike estimeringsteknikker som finnes med hovedvekt på de fra den Britiske Standarden BS 7910 for å finne et estimat på bruddseighet ut fra slagseighet.

1.3.2. Delmål:

1. Kartlegge og studere de ulike formlene mellom bruddseighet og slagseighet for konstruksjonsstål under forskjellige temperaturforhold.
2. Presentere de ulike estimeringsteknikkene på en god og tilfredsstillende måte.
3. Få oversikt over andre estimeringsteknikker som eksisterer.
4. Lage eksempler (caser) som viser bruken av formelverket.
5. Praktisk slagseighetstesting.
6. Prøve formelverket opp mot praktiske tester på laboratoriet.
7. Tilegne meg ytterligere informasjon fra litteratur, andre instanser og institusjoner som kan ha nyttig informasjon å tilføye.

Vedlagt i oppgaven er det et Gantt diagram som viser fremdriften, og som gir en utfyllende oversikt over hvordan arbeidet har blitt planlagt og gjennomført. Diagrammet viser hvor mye tid jeg har planlagt å bruke på de ulike delmålene.

1.3.3. Begrensninger:

- FAD (Failure Assessment Diagrams) er utelatt.
- Ser kun på konstruksjonsstål og ikke andre materialer.
- Ytterligere forklaring av J-integral.
- Unnlater statistisk analyse av formlene for å se hvor bra de korrelerer og eventuelt hvor stor feilprosent som oppstår med bruk av virkelige prøvedata.

1.4. Kvalitetssikring

1.4.1. Kvalitetssikring rapport:

Jeg har gått gjennom rapporten og språkvasket den, referanser, tabellnummerering, figurnummer, formelnummer og sidetall er sjekket flere ganger. Jeg har også brukt mal fra veileder. Utrekningene er kontrollert opptil flere ganger og jeg har kontrollert at alle symboler er kommet med i symbolisten.

1.4.2. Kvalitetssikring produkt:

Kravspesifikasjonene er diskutert og tolket i samråd med veileder på jevnlige møter. Jeg har brukt de standardene veileder har anbefalt og jeg har tilegnet med den informasjon jeg har kunnet hente både fra veileder, litteratur, internett og andre instanser.

1.5. Løsningsverktøy

1.5.1. Prosjektstyring

Det er utarbeidet en arbeidsplan i Microsoft Excel og jeg har laget et Gantt diagram som viser den planlagte fremdriften. Gantt diagrammet viser arbeidsomfanget fordelt utover den tiden jeg har hatt til rådighet. Det er satt opp tidsskjema på hvor lang tid jeg har planlagt å bruke på hvert punkt. Arbeidsplanen gir oversikt over arbeidsoppgavene i prosjektet og de tidsfrister jeg har gitt meg selv. Dette har vært en god måte å organisere arbeidet på og det har bidratt til å gi meg selv god oversikt over den tiden jeg har hatt til rådighet.

1.5.2. Målinger

Målinger har blitt gjort på material laboratoriet ved Universitetet der jeg har brukt et Charpy slagseighetsapparat med skala slik at man kan lese av slagenergien som må til for å slå av prøvestaven. For å måle temperatur på prøvestaven før og etter bruddet har jeg brukt et varmekamera fra FLIR Systems.

1.5.3. Tekstbehandling

Gjennom hele oppgaven har jeg brukt Microsoft Word som tekstbehandlings verktøy. I tillegg til dette har jeg benyttet meg hyppig av regneark i Microsoft Excel til beregninger av store mengder data og til å lage tilhørende diagrammer og grafer.

1.5.4. Dataverktøy

Gjennom oppgaven har jeg brukt følgende programvarer:

- Paintbrush – Bildebehandling og redigering.
- Photoshop – Bildebehandling.
- Microsoft Word – Tekstbehandling.
- Microsoft Excel – Bruk av regneark.
- Axure RP Pro 6.5 - For å lage flytdiagram.

1.6. Symboler

Tabell 1: Symboler og enheter som er brukt gjennom oppgaven.

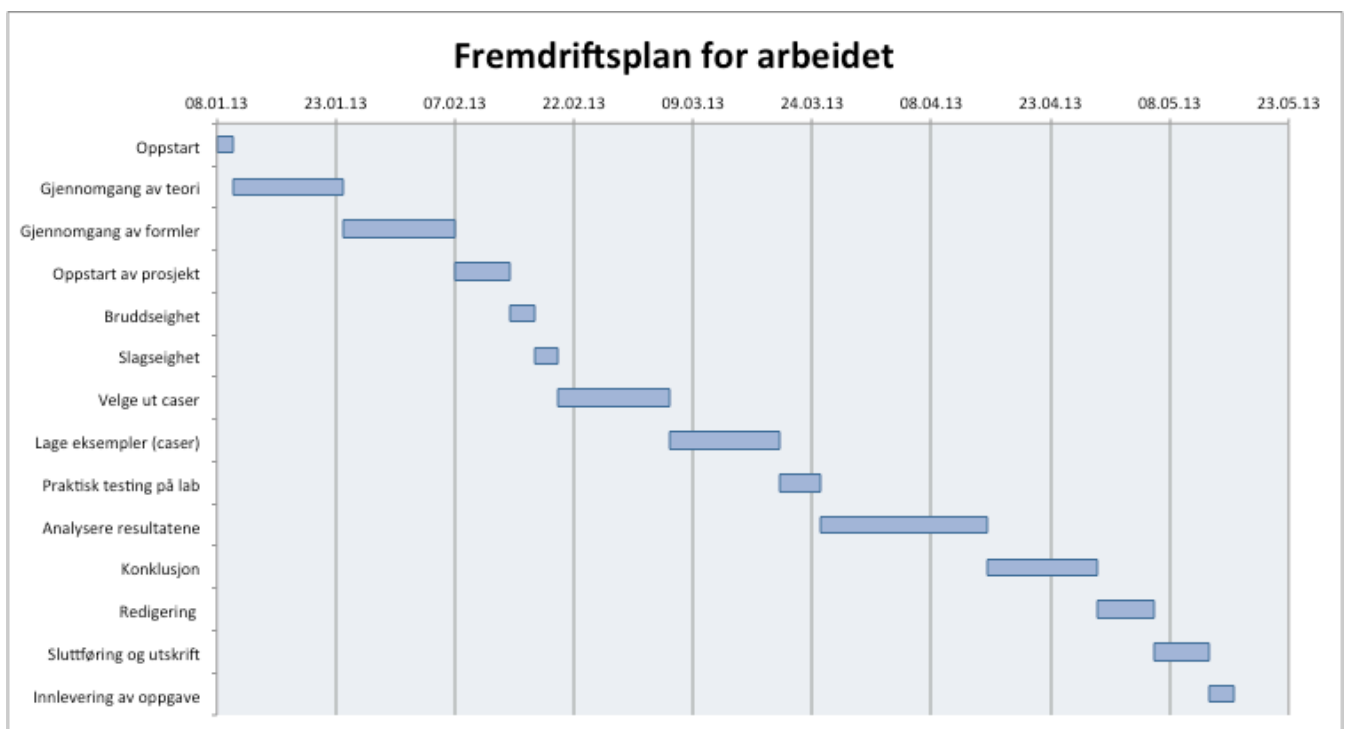
Symbol	Betydning	Enhet
K_{mat}	Estimat av bruddseighet	$MPa\sqrt{m}$
T	Temperatur	$^{\circ}C$
E	E-modul	MPa
ϵ	Tøyning	-
B	Tykkelsen på materialet	mm
C_v	Slagseighet	Joules
P_f	Sannsynligheten for at K_{mat} er mindre enn estimert	%
K_{IC}	Bruddseighet - Kritisk	$MPa\sqrt{m}$
K_I	Bruddseighet	$MPa\sqrt{m}$
W	Bredden på materialet	mm
S	Lengde	mm
H	Høyde	mm
F	Kraft	N
D	Hulldiameter	mm
P_Q	Foreløpig belastning	N
Φ	Fase	-
a	Sprekk lengde	mm
ν	Poissons tall	-
δ	Åpning i spissen av sprekken (CTOD)	mm
e	Emissivitet	-
σ_y, R_e, f_y	Flytegrense	MPa
J_{int}	Mål for elasto-plastisk slagseighet (J-integral)	N/mm
ΔT_{SS}	Forflytning i omslagstemperatur for små prøvestaver	$^{\circ}C$
B_{ss}	Tykkelsen til "sub size" prøvestaver	mm
$T_{27/28J}$	Temperaturen ved 27/28J Charpy slagseighet	$^{\circ}C$
K_f	Bruddseigheten korresponderende til P_f	$MPa\sqrt{m}$
K_{min}	Bruddseighet for den nedre grensen, ofte satt som 20 $MPa\sqrt{m}$	$MPa\sqrt{m}$
K_0	Bruddseigheten korresponderende til 63,2% bruddsannsynlighet	$MPa\sqrt{m}$
T_0	Temperaturen hvor gjennomsnittlig bruddseighet er $100 MPa\sqrt{m}$	$^{\circ}C$
T_{01}	Referanse temperatur	$^{\circ}C$
α	Konstant satt til $31 MPa\sqrt{m}$	$MPa\sqrt{m}$
β	Konstant satt til $77 MPa\sqrt{m}$	$MPa\sqrt{m}$
γ	Materialkonstant satt til 0,019	-
σ	Spenning	MPa
f	Korreksjonsfaktor	-
A	Tøynings parameter	-
ΔT_{ϵ}	Temperatur forflytning som følge av tøyningen ϵ og ϵ_0	$^{\circ}C$
V_g	Sprekkåpningen under CTOD testing	mm

1.7. Prosjektplanlegging

Masterperioden går over hele vårsemesteret og jeg har valgt å benytte meg av et Gantt diagram for å gi meg selv bedre oversikt og for å kartlegge fremdriften av arbeidet. I tabell 2 har jeg listet arbeidsoppgavene i kronologisk rekkefølge hvor jeg har satt meg selv tidsfrister og man kan se varigheten i antall dager.

Tabell 2: Arbeidsplan gjennom vårsemesteret.

Type	Start dato	Varighet (Antall dager)	Sluttdato
Oppstart	08.01.13	2	09.01.13
Gjennomgang av teori	10.01.13	14	23.01.13
Gjennomgang av formler	24.01.13	14	06.02.13
Oppstart av prosjekt	07.02.13	7	13.02.13
Bruddseighet	14.02.13	3	16.02.13
Slagseighet	17.02.13	3	19.02.13
Velge ut caser	20.02.13	14	05.03.13
Lage eksempler (caser)	06.03.13	14	19.03.13
Praktisk testing på lab	20.03.13	5	24.03.13
Analysere resultatene	25.03.13	21	14.04.13
Konklusjon	15.04.13	14	28.04.13
Redigering	29.04.13	7	05.05.13
Slutføring og utskrift	06.05.13	7	12.05.13
Innlevering av oppgave	13.05.13	3	15.05.13



Figur 5: Gantt diagram som viser fremdriftsplanen for arbeidet gjennom hele vårsemesteret 2013.

1.8. Terminologi

Tabell 3: I tabellen er ord og uttrykk som er brukt ofte gjennom oppgaven.

Forkortelse	Betydning
CTOD	”Crack Tip Opening Displacement” Åpningen til sprekkespissen
SUB-SIZE	Liten prøvestav
HAZ	Heat-Affected Zone – Varme Påvirket Sone
NDTT	Nil Ductility Transition Temperature
NDT-metode	Non-Destructive Testing, prøvemethode for å oppdage sprekker og defekter
FATT	Fracture Appearance Transition Temperature
SINTAP	Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry
NORSOK	Norsk Søkels Konkurransesepisjon
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
NS	Norsk Standard
DNV	Det Norske Veritas

1.9. Formler

I dette avsnittet er det listet opp en oversikt over relevante formler med beskrivelse som er benyttet gjennom hele oppgaven.

1.9.1. Nedre grense korrelasjon

Tabell 4: Oversikt over noen relevante formler benyttet i oppgaven.

Nr.	Formel	Beskrivelse
1	$K_{mat_{25}} = 12\sqrt{Cv}$	Korrelasjonsformel for nedre grense området. Gjelder for 25mm tykkelser.
2	$K_{mat} = [(K_{mat,25} - 20) \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4}] + 20$	Tykkelseskorrigeringsformel.

1.9.2. Omslagsområdet (The Master Curve Approach)

Nr.	Formel	Beskrivelse
1	$K_{B2} = (K_{B1} - K_{min}) \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{\frac{1}{4}} + K_{min}$	Tykkelseskorrigering for B ₁ og B ₂ .
2	$P_f = 1 - \exp\left(-\left(\frac{K_f - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right)^4\right)$	Kumulative bruddsannsynligheten. Sannsynligheten for at K _{mat} er mindre enn estimert.
3	$K_0 = \alpha + \beta \cdot \exp[\gamma \cdot (T - T_0)]$	Temperaturavhengigheten til K ₀ i MPa√m.
4	$K_0 = 31 + 77 \exp[0,019(T - T_0)]$	Temperaturavhengigheten til K ₀ i MPa√m for 25mm tykkelse.
5	$TK_{100MPa\sqrt{m}} = T_{28J} - 18^\circ C (\pm 15^\circ C)$	Forholdet mellom 27/28 J og 100 MPa√m Charpy og bruddseighets temperaturer TK _{27/28J} og TK _{100 MPa√m} .
6	$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{0,019(T-T_{28J}+18)}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4}$	Bruddseighet, K _{mat} for omslagsområdet "The Master Curve Approach".

1.9.3. Øvre grense korrelasjon

Nr.	Formel	Beskrivelse
1	$K_{mat} = 0,54Cv + 55$	Formel for øvre grense korrelasjon.
2	$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{Cv}{\sigma_y} - 0,02\right)$	Øvre grense korrelasjon som tar hensyn til flytegrensen.

1.9.4. Andre nyttige formler

Nr.	Formel	Beskrivelse
1	$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y\delta_{mat}E}{(1-\nu^2)}\right]^{0,5}$	Formel for å konvertere CTOD til K _{mat} .
2	$K_{mat} = \left[\frac{1,3\sigma_f\delta_{mat}E}{(1-\nu^2)}\right]^{0,5}$	Formel for å konvertere CTOD til K _{mat} .
4	$\Delta T_\varepsilon = \frac{1440 - p_y}{550} \left(\ln\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)\right)^{1,5}$	Utleddning av temperatur forflytningen.

5	$\sigma_y = f(T \cdot \log \left[\frac{A}{\varepsilon} \right])$	Zener-Holloman – tøyning avhengigheten.
6	$\Delta T_0 \cdot \ln \left(\frac{A^R}{K_f} \right) = \text{Konstant}$	Formel (26) i henhold til K.
7	$\Delta T_0 = \frac{T_{01} \times \ln(K_1)}{\Gamma - \ln(K_1)}$	Overføringshastighet induisert av temperatur forflytning.
8	$\Gamma = 9,9 \exp \left[\frac{T_{01}}{190} \right]^{1,66} + \left[\frac{p_y}{722} \right]^{1,09}$	Parameteren beskriver flytegrense og T_{01} .
9	$\Delta T_0 = \frac{T_{01} E \times \ln(K_1)}{[9,9 \exp \left(\left(\frac{T_{01}}{190} \right)^{1,66} + \left[\frac{p_y}{722} \right]^{1,09} \right)] - \ln(K_1)}$	Kombinasjon av formel (28) og (29). Temperaturforflytningen som følge av tøyning.
10	$K = E \varepsilon \sqrt{\pi a}$	Forholdet mellom ε og K .
11	$\Delta T_{ss} = 51,4 \cdot \ln \left[2 \left(\frac{B_{ss}}{10} \right)^{0,25} - 1 \right]$	Forflytning av omslagstemperatur assosiert med sub-sized Charpy prøver ΔT_{ss} .
12	$B > 2,5 \times (K_{1c} / \sigma_y)^2$	Tykkelseskrav.
13	$\Phi = \frac{\delta_c}{2\pi \varepsilon_{ys} a} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}} \right)^2$	Dimensjoneringsparameteren til design-kurven for CTOD-metoden.
14	$\Phi = \frac{\delta_c}{2\pi \varepsilon_{ys} a} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}} - 0,25$	Dimensjoneringsparameteren til design-kurven for CTOD-metoden.
15	$a = \frac{\delta_c \cdot E \cdot R_e}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^2}$	Sprekklengde for CTOD.
16	$a = \frac{\delta_c \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot (\sigma - 0,25 \cdot R_e)}$	Sprekklengde for CTOD.
17	$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$	K_I verdi.
18	$K_I = f \cdot \sigma \sqrt{\pi a}$	K_I verdi med korreksjonsfaktor.
19	$K_{mat} = \sqrt{J_{mat} \cdot E / (1 - \nu^2)}$	Formel for å konvertere J_{int} til K_{mat} .
20	$\delta_c = \frac{K_C^2}{E \cdot R_e}$	CTOD ved plan spenning.

2. BESKRIVELSER

2.1. Kravspesifikasjoner

Oppgaven går ut på å redegjøre for hvilke estimeringsteknikker som eksisterer for å estimere bruddseighet ut fra slagseighet for konstruksjonsstål under forskjellige temperatur og tykkelsesforhold. Jeg har valgt å ta utgangspunkt i den Britiske Standarden BS 7910 og lagt størst vekt på de estimeringsteknikkene som er presentert her. Jeg har også studert andre estimeringsteknikker som eksisterer og har presentert noen av disse i rapporten samt sammenlignet dem. Jeg har blitt enig med veileder om at jeg gjennom denne rapporten skal se på følgende:

- Konstruksjonsstål.
- Estimeringsteknikker med hovedtyngde på de beskrevet i den Britiske Standarden BS 7910.
- Caser som viser bruken av formelverket.

2.2. Konstruksjonsstål

I all hovedsak har jeg kun valgt å fokusere på konstruksjonsstål i denne oppgaven.

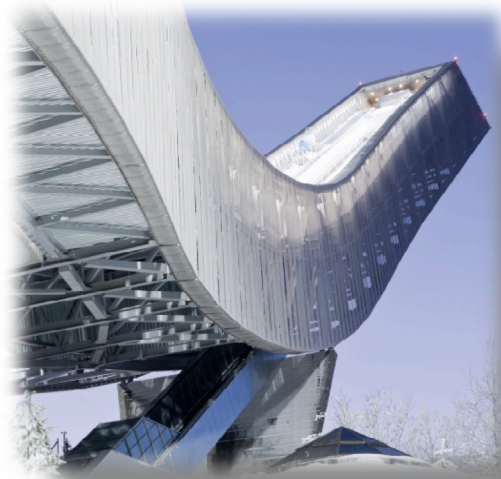
Konstruksjonsstål blir brukt til bærende og kraftoverførende deler i:

- Maskiner
- Kjøretøy
- Fartøy
- Bygninger
- Bruer
- Tanker
- Oljeplattformer
- Offshore industrien

Det viktigste konstruksjonsmaterialet vi har i dag er definitivt konstruksjonsstål. De aller fleste innen industrien benytter seg av akkurat dette konstruksjonsmaterialet. Konstruksjonsstål er mye brukt og er antageligvis det konstruksjonsmaterialet som er mest brukt i dagens industri. Derfor er oppdatert kompetanse rundt dette konstruksjonsmaterialet veldig viktig, og spesielt i dag da det stilles høye krav til sikkerhet og kvalitet. Konstruksjonsstål brukes innen helt sentrale deler av samfunnsstrukturen. Man kan se bruken av konstruksjonsstål i alt fra infrastruktur på land, bygg og anlegg, innen transport, innen petroleumsvirksomheten og prosessindustrien [6].

Konstruksjonsstål blir brukt til det aller meste, og er derfor følgelig veldig viktig for industrien som helhet. Å tilegne seg kunnskap rundt materialet er derfor av stor betydning. Å tilegne seg kunnskap rundt konstruksjonsstål vil også være veldig viktig i årene fremover. Årsaken til dette er fordi strukturer og bygninger blir stadig utsatt for tøffere omgivelser. Kravene til kvalitet og sikkerhet har økt drastisk i de senere årene. Konstruksjonsstålene blir delt inn etter flytegrense og sveisesikkerhet [S.3]. Siden en gradering etter sveisesikkerhet ikke kan ta hensyn til alle parameterne, er det

begrenset til den viktigste faktoren, nemlig sammensetning av materialet. At en sveis ikke skal føre til noen statisk svekkelse av konstruksjonen, betyr at materialsammensetningen i seg selv ikke skal gi noen fare for materialfeil. Den viktigste og farligste feiltypen som kan oppstå i konstruksjonsstål, er sprekker [S.3]. Sprekker kan føre til brudd og i verste fall forårsake en katastrofe.



Figur 6: Konstruksjonsstål brukt i nye Holmenkollen [5].

2.3. Brudd kontroll

Å kontrollere maskindeler eller strukturer for brudd og sprekk-lignende defekter er noe som alltid har vært til stor bekymring for designere, metallurger, produksjons og vedlikeholds ingeniører, og ikke minst inspektører [S.9]. Disse har et ansvar for å sikre trygge operasjoner uten at det forekommer tragiske utfall på grunn av brudd. Av alle de ulike former for svikt; knekking, brudd som følge av en sprekk, plastisk deformasjon og lignende er brudd ansett som en av de farligste. Dette er fordi det kan skje helt uventet og uten noe som helst forvarsel. Svært sjeldent forekommer brudd på grunn av en uforutsett overbelastning på en uskadet struktur. Vanligvis, forekommer brudd på grunn av strukturelle feil og produksjonsfeil som har ført til forplantning av sprekker. Disse sprekke vokser så suksessivt og resultatet er at de fører til brudd [S.9]. Dette er årsaken til at viten rundt bruddseighet er så viktig.

2.3.1. Skade tolerant design

Skade tolerant design er å konstruere på en slik måte at en skade, defekt eller en sprekk ikke nødvendigvis fører til brudd med det første. Det er viktig at man har hyppige inspeksjonsintervaller slik at man oppdager sprekken i tide og kan foreta de nødvendige tiltakene som trengs for å hindre videre sprekkvekst.

Filosofien rundt skade tolerant design ble introdusert rundt 1970 tallet [23]. Prinsippet med skade tolerant design er å få en ekspertise for, og ikke minst kontroll over sprekkdannelse før den fører til brudd. Sprekkdannelse kan forekomme i alt fra fly, bygninger, tog, maskindeler, strukturer osv.



Ved å ha tilstrekkelig ekspertise og kunnskap rundt utviklingen av sprekk og sprekkdannelse kan man få på plass de riktige tiltakene i tide for å forhindre sprekk i å vokse videre. I verste fall vokser sprekk så mye at det fører til raskt brudd, og dette kan få fatale konsekvenser der menneskeliv kan gå tapt. Hovedmålet med filosofien er å få på plass hyppige inspeksjonsintervaller for å oppdage og få kontroll på sprekke i god tid før de blir så store at de fremstår som farlige og dermed blir en risiko. Gode rutiner for inspeksjon, grunnleggende kunnskap og ikke minst erfaring er med på å få på plass gode rutiner slik at man oppdager sprekkdannelse i god tid og at man har kontroll på dem.

Skade tolerant design kan dermed defineres ved at man legger til rette for at en sprekk eller defekt ikke fører til et katastrofalt utfall, og at man kan oppdage skaden i god tid og få den reparert. Det å kunne estimere bruddseigheten til et materiale er derfor veldig essensielt innen skade tolerant design.

2.3.2. NDT-metode

En av metodene innenfor skade tolerant design for å oppdage sprekker og defekter i tide er NDT-metoder.

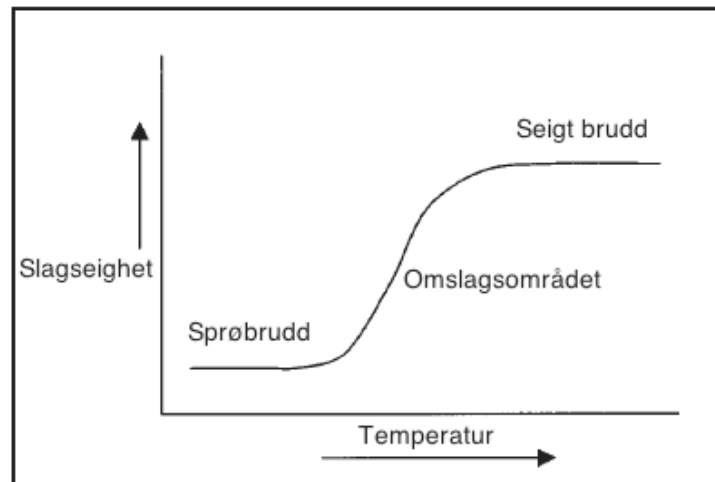
NDT står for Non-Destructive Testing eller på norsk, ikke-destruktiv prøving. Metoden består av en rekke prøvingsmetoder for å påvise materialfeil. Hensikten er å påvise materialfeilen uten å redusere prøvingsobjektets funksjonsevne eller egenskaper. Prøvingen kan utføres på et verksted, i laboratorier eller ute i friluft. I visse tilfeller kan prøvingen også utføres mens selve objektet er i bruk [7]. NDT-metoder er ansett som veldig viktig innen skade tolerant design og bidrar til å forhindre fremtidige ulykker forårsaket av brudd.

Vanlige NDT-metoder er:

- **MT** – Magnetpulverprøving
- **VT** – Visuell inspeksjon
- **ET** – Virvelstrømsprøving
- **UT** – Ultralydprøving
- **PT** – Penetrantprøving
- **RT** – Radiografiprøving

2.4. Slagseighet

Slagseighet kan defineres som et materiales evne til å motstå initiering og forplantning av sprekker. Slagseigheten er også et uttrykk for hvor kraftig slag som skal til før materialet får brudd. Slagseighet blir ofte målt i Joules med betegnelsen (J).

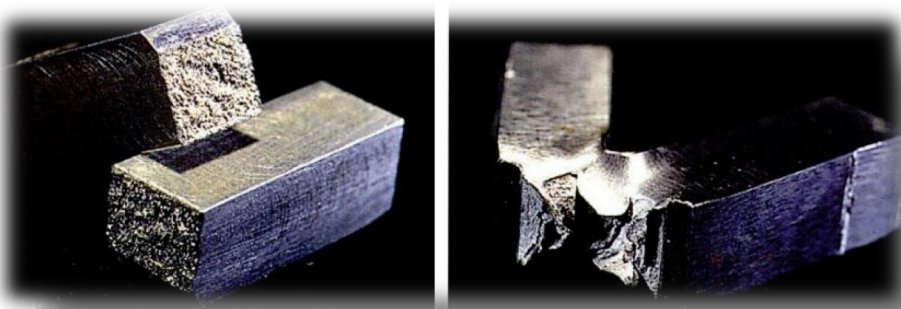


Figur 7: Omslagskurven for stål [9].

Figur 7 viser omslagskurven for stål og gjelder for ferrittiske stål. Ved lave temperaturer vil det oppstå fare for sprøbrudd, og ved høye temperaturer vil det oppstå fare for seige brudd. Midt imellom har man omslagsområdet der bruddet går gradvis fra å være sprøtt til seigt, ofte definert ved 27/28 Joules. Årsaken til at omslagstemperaturen ligger mellom 27 og 28 Joules er på grunn av den originale korrelasjonen utarbeidet av "Marandet & Sanz" var 20 ft/lbs, som konvertert til Joules er 27,116 [15]. For å være konservativ ble dette avrundet opp til 28 Joules [S.2]. Jeg har gjennom denne rapporten valgt å bare referere til 27/28 Joules som omslagstemperatur. Et konstruksjonsstål kan være sprøtt opp til romtemperatur.

Faktorer som påvirker omslagskurven for stål er:

1. Lav temperatur.
2. Høy belastningshastighet.
3. Tredimensjonale kjerver.
4. Selve materialet.



Figur 8: Bildet til venstre viser klart sprøbrudd, der staven er brukket rett av. Bildet til høyre viser klart seigt brudd, der staven ofte fortsatt henger sammen etter bruddet [24].

Slagseighetsprøver gir oss opplysninger:

1. Om strukturtilstanden (strukturenhet, om materialet er grov- eller finkornet).
2. Om det er anvendt riktige mekaniske og/ eller termiske behandlingsmetoder.
3. Om materialet har tendens til sprøbrudd eller ikke.

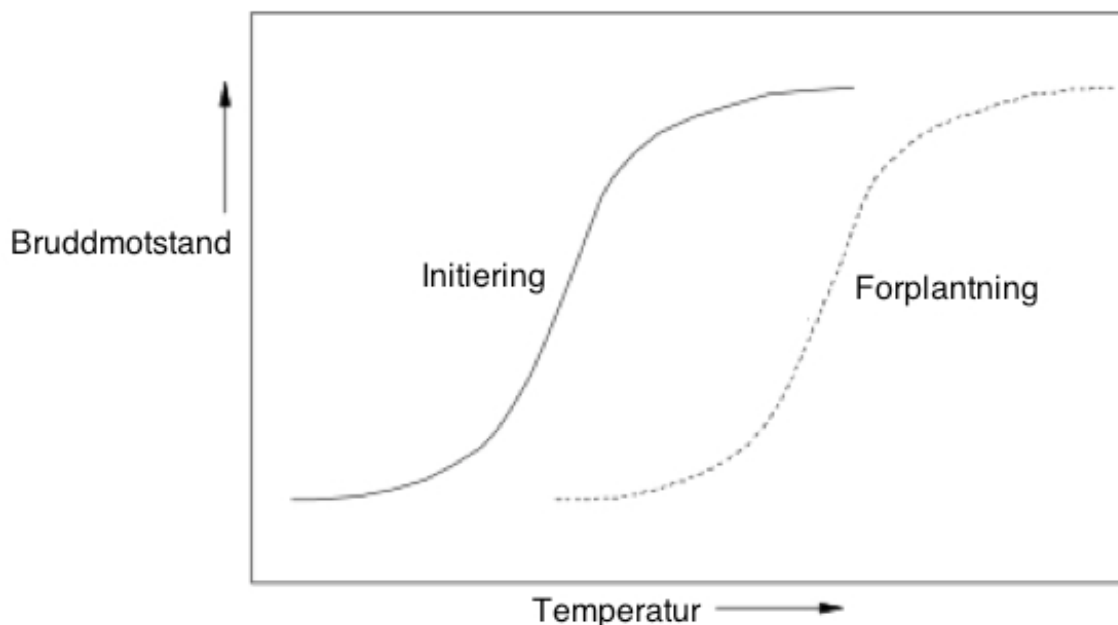
[S.20]

I praksis prøver man materialenes slagseighet for å kunne bedømme sprøbruddsikkerheten. For stålprodusenter er det viktig å vite om varmebehandlingen er riktig gjennomført. Gjennom en riktig utført varmebehandling har man mulighet for å påvirke strukturen og dermed bedre kvaliteten. Visse tilstander, som for eksempel anløpssprøhet hos stål er det bare slagseighetsprøver som kan gi opplysninger om [S.20]. Videre er slagseighetsprøver den sikreste måten til å oppdage hydrogenangrep på stål [S.20]. Et matt brudd tyder på hydrogenangrep. For konstruksjoner innen lavtemperaturteknikken er det særlig viktig at materialene ikke blir for sprø ved de lave temperaturer som anvendes. Ved valget av slike konstruksjonsmaterialer er slagseighetsprøver av stor verdi. Slagseighetsprøver har også stor betydning i forbindelse med material- og elektrodevalg ved sveisede konstruksjoner [S.20].

Andre ting som påvirker omslagskurven:

- **Deformasjonshastighet:**

Omslagskurven for stål forskyves mot høyre når deformasjonshastigheten øker. Dette vises i figur 9.

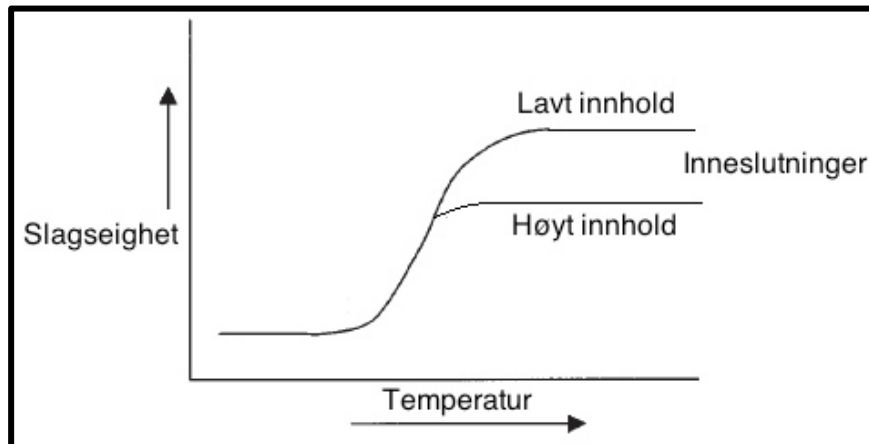


Figur 9: Omslagskurven forskyves mot høyre når deformasjonshastigheten øker [S.23].

I området foran en løpende sprekke er deformasjonshastigheten meget stor. Er den for stor, eller temperaturen for lav, rekker ikke atomplanglidemekanismen å følge med, og sprekken vokser ved kløving av strukturen, altså ved at atomplan rives fra hverandre. Kløving binder minimal energi og bruddet blir sprøtt [S.23].

- Inneslutninger:

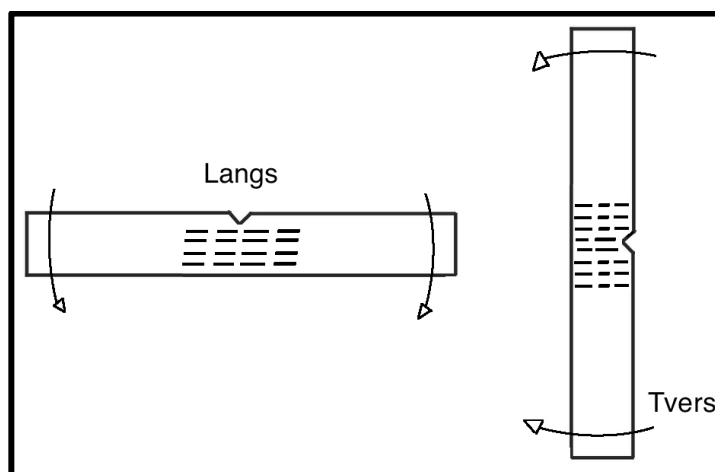
Inneslutninger er partikler av ikke-metalliske forurensinger i metall, vanligvis oksider, silikater eller sulfider [26]. Øvre platå slagseighet faller når innholdet av inneslutninger stiger. Lavt innhold av inneslutninger fører til en høyere slagseighet. Moderne stål har som oftest et lavere innhold av inneslutninger [S.23].



Figur 10: Øvre platå slagseighet faller når innholdet av inneslutninger stiger [S.23].

- Belastningsretning:

Platåverdiene av staver på tvers av valseretningen er mindre enn de på langs.



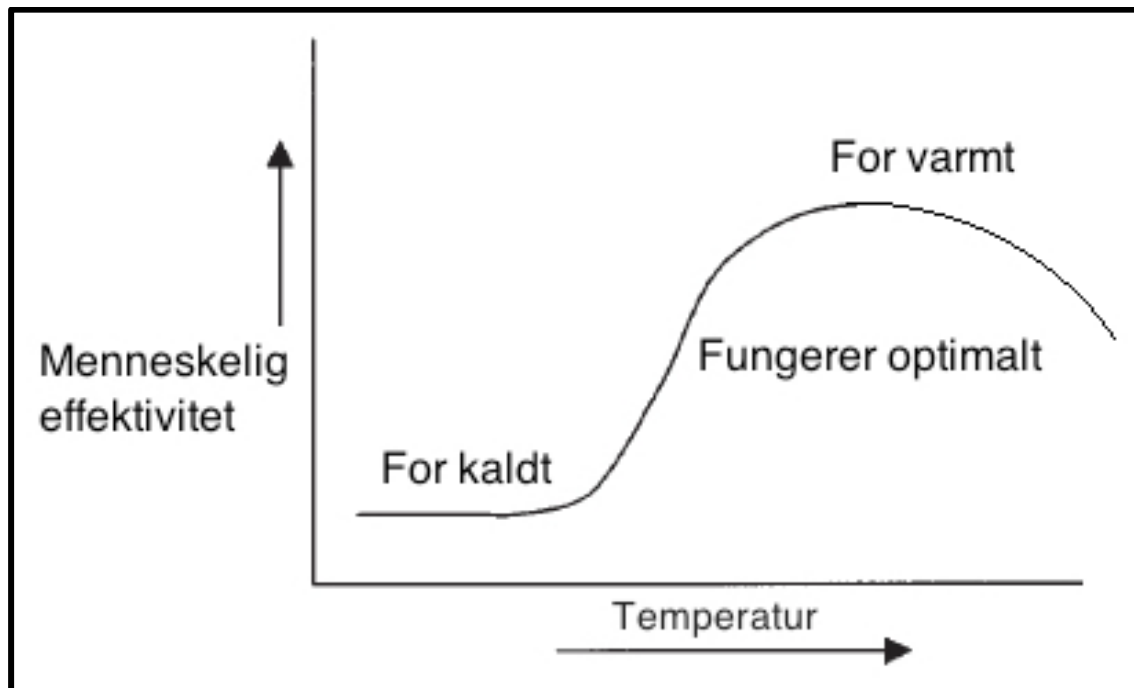
Figur 11: Bildet viser sulfid båndene på langs og på tvers [S.23].

Når slagseighetsstaven skjæres ut på tvers av valseretningen dannes sulfid-bånd [S.23]. Sulfid-båndene danner spenningskonsentrasjoner som reduserer energiabsorpsjonen, sammenlignet med en stav på langs [S.23]. Det blir litt som når man skal kløyve ved, det er lettere å kløyve med fiberretningen enn på langs av fiberretningen. Figur 11 illustrerer prøvestaver med sulfid-bånd på langs og på tvers.

Mangansulfider i moderne stål er plastiske ved valsetemperatur, og i valsede plater opptrer de som tynne bånd, som avbryter sammenhengen i matriks. De tynne sulfid-båndene illustreres også i figur 11. Når en plate blir utsatt for krefter på tvers av valseplanet, rives det spalter i den. Dette kan forårsake utrivningsbrudd [S.23]. Det

var et slikt utrivningsbrudd som satte igang en utmattingsprekk i boligplattformen “Aleksander Kielland” og som resulterte i at plattformen havarete i 1980 [S.23].

Stål oppfører seg litt på samme måte som oss mennesker. Når det er kaldt ute fungerer vi dårlig, ved romtemperatur fungerer vi optimalt og når det blir for varmt orker vi heller ingenting. Akkurat det samme er det med stål også. Figur 12 synes jeg representerer dette veldig godt. Sånn sett kan man godt sammenligne omslagskurven for stål med menneskelig effektivitet.



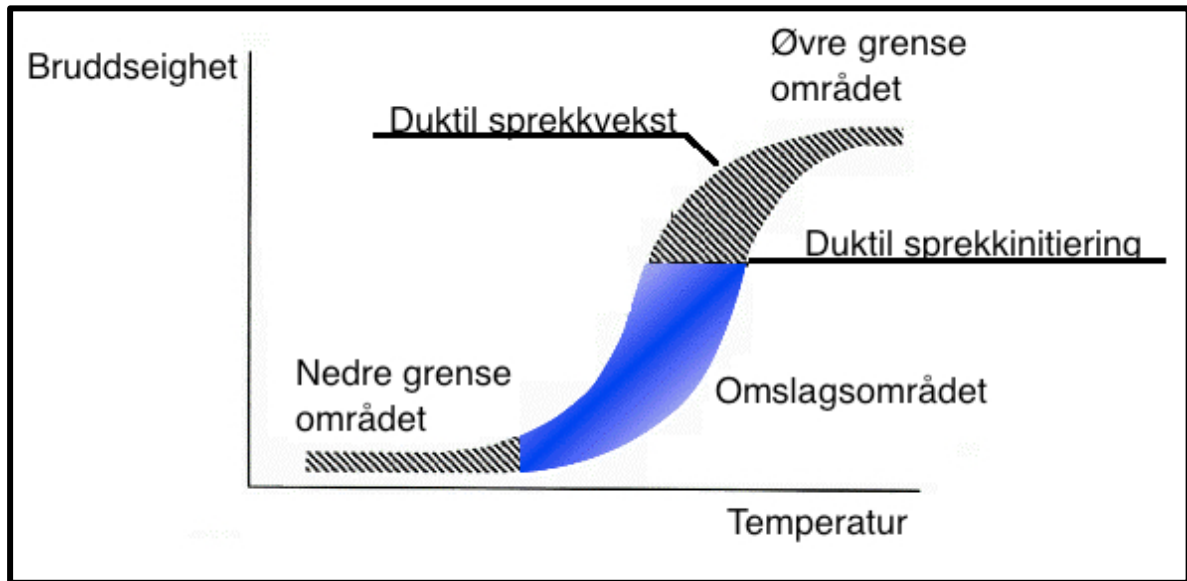
Figur 12: Figuren viser at mennesket fungerer optimalt ved romtemperatur [9].

2.5. Bruddseighet

Bruddseighet kan defineres som et materiales evne til motstå brudd når det har en sprekk.

Bruddseighet dreier seg om hvor lett og raskt en sprekk vil forplante seg gjennom et materiale. Dersom man tar for seg et stykke materiale med en liten sprekk. Utsetter man materialet for en strekkraft, vil det oppstå et visst spenningsnivå i materialet nærmest sprekken, som vil kunne få sprekken til å utbre seg gjennom materialet. Hvis materialet har lav bruddseighet, skal det en liten strekkraft til for å forårsake brudd.

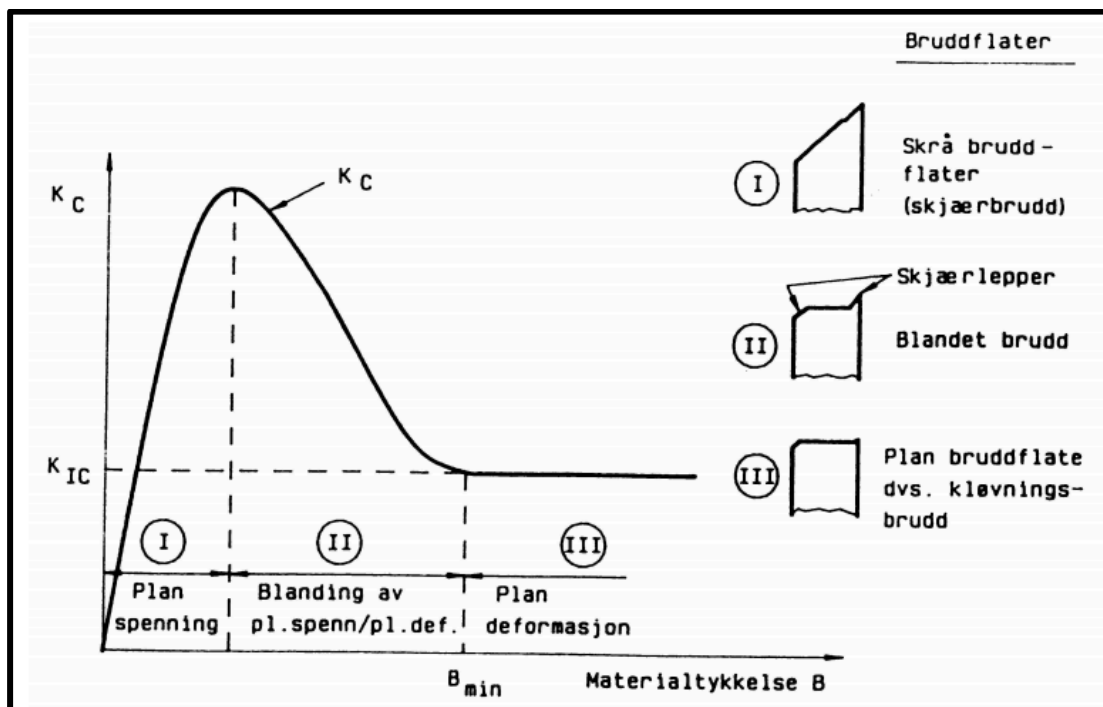
Man kan si at man har et nedre grense område, et omslagsområde og et øvre grense område på omslagskurven for bruddseigheten. Ved disse ulike områdene oppfører stålet seg annerledes. Det oppfører seg sprøtt ved lave temperaturer og seigt ved høye temperaturer. Midt imellom er det et omslagsområde, og det er i dette område materialets oppførsel går gradvis fra å være sprøtt til seigt. Det vil forekomme duktil sprekkinitering når man beveger seg over på det øvre grense område og videre til duktil sprekkevækst. Ved det nedre grense område, altså ved lav temperatur er det stor fare for sprøbrudd. Figur 13 illustrerer dette og viser hele bruddseighetskurven.



Figur 13: Viser de forskjellige områdene innenfor bruddseighetskurven. Det blå området representerer omslagsområdet [11].

Faktorer som påvirker bruddseigheten til et materiale:

- Tykkelse:

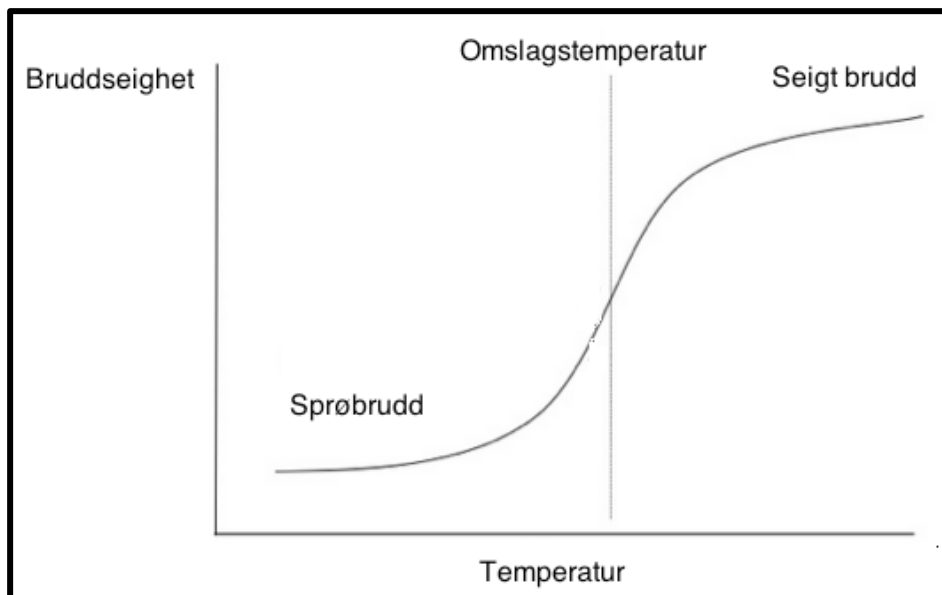


Figur 14: Bruddseighetens variasjon med materialtykkelsen [S.7].

Materialtykkelsen spiller en betydelig rolle for bruddseigheten. Figur 14 viser bruddseighetens variasjon med materialtykkelsen. Ved økt tykkelse går man fra plan spenning i område 1, til en blanding av plan spenning og plan deformasjon i område 2, før man går over i ren plan deformasjon i område 3.

- Temperatur

Lavere temperatur øker sannsynligheten for sprøbrudd. Figur 15 illustrerer dette.

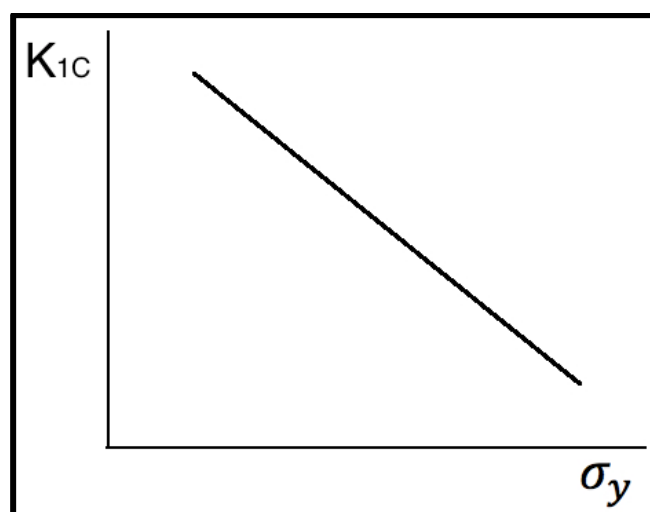


Figur 15: Viser omslagkurven for stål, ved lave temperaturer vil det kunne forekomme sprøbrudd og ved høye temperaturer vil det kunne forekomme seige brudd. Midt imellom er omslagsområdet, som er definert ved 27/28 Joules [8].

- Flytespenning

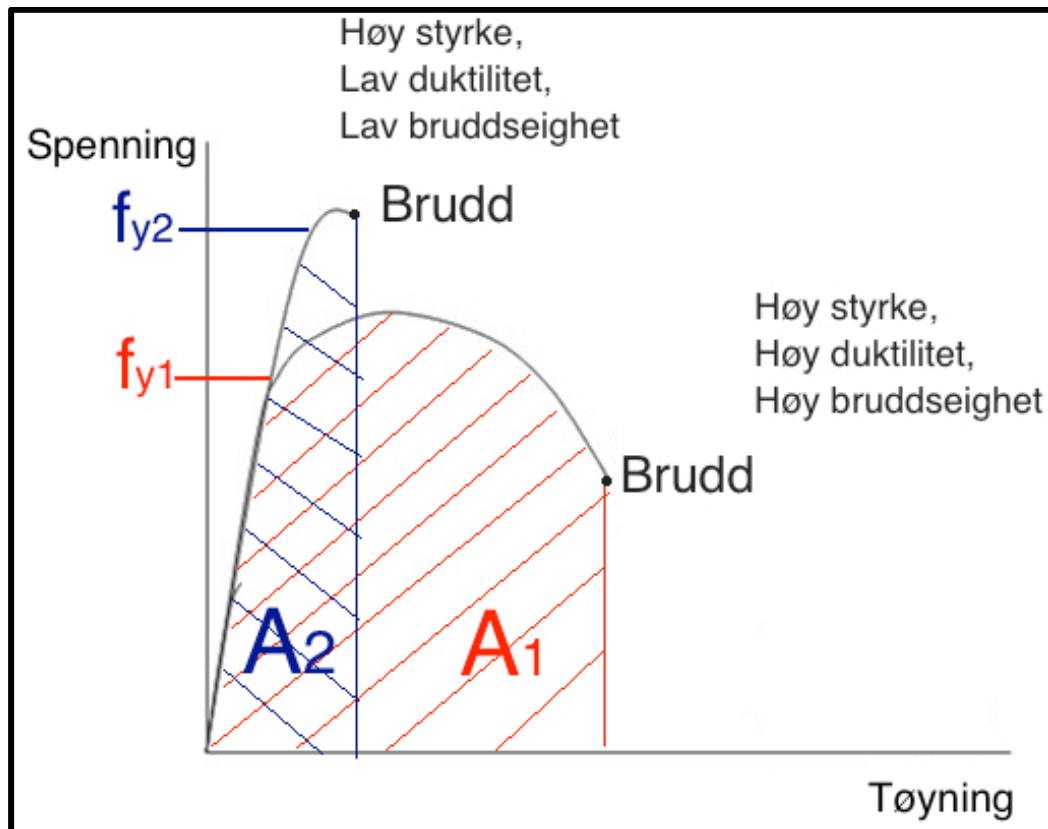
Flytespenningen er den spenningen der et materiale endrer seg fra å oppføre seg elastisk til plastisk. Det vil si jo høyere flytespenning stålet har desto mer tåler det, som igjen kan bety høyere bruddseighet [16]. Men dette avhenger av duktiliteten. Flytespenningen får vanligvis symbolet: σ_F , R_e eller f_y .

En viktig observasjon er at som regel når flytegrensen til et materiale øker så reduseres duktiliteten. Dermed får man en reduksjon i K_{1C} . Dette fører til en større fare for et katastrofalt utfall som følge av brudd. Dette er en veldig viktig konklusjon som alt for mange ingeniører overser [S.21]. Figur 16 illustrerer dette.



Figur 16: Høyere flytegrense, lavere K_{1C} .

Arealet under spennings/tøynings kurven viser hvilken energi materialet kan ta opp før brudd inntreffer. Et stort areal vil indikere en høy bruddseighet [S.20].



Figur 17: Arealet under kurven sier noe om bruddseigheten. Figuren illustrerer at dersom $A_1 > A_2$ så er $K_{1A1} > K_{1A2}$.

Dersom:

$$A_1 > A_2$$

Så er:

$$K_{1A1} > K_{1A2}$$

- Miljøpåvirkning

Andre ting som vil ha en effekt på bruddseighet er selvfølgelig de ytre påvirkningene på materialet. Hvilke omgivelser materialet blir utsatt for vil kunne ha stor påvirkning på et materiales bruddseighet. Korrosjon er et veldig vanlig problem og er blant de påvirkninger som øker faren for brudd.

2.6. Slagseighet versus bruddseighet

Hovedforskjellen mellom disse to begrepene er at slagseighet gir et mål for hvor mye energi som skal til for å slå av en prøvestav. Bruddseighet måler materialets evne til å motstå brudd når det allerede har en utmattingssprekk.

Faktorer som øker risikoen for sprøbrudd:

1. Lav temperatur
2. Høy belastningshastighet (slag)
3. Tredimensjonale spenningstilstander, for eksempel ved geometriske endringer (kjerver) i et konstruksjonselement.

En kombinasjon av disse faktorene kan være svært farlig.

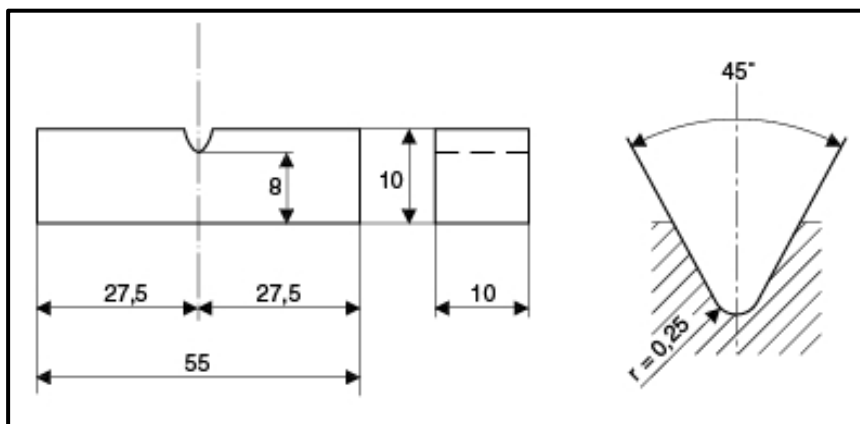
Tabell 5: Viser forskjellen på slagseighetstesting og bruddseighetstesting.

Forskjell	Slagseighet (C_v)	Bruddseighet (K_{1C})
Prøvetype	10x10x55 (mm)	$B > 2,5 \times (K_{1C}/\sigma_y)^2$
Overføringshastighet	Dynamisk	Statisk
Geometri feil	V eller U – kjerv	Dyp sprekk
Hendelsesforløp	Brudd initiering og forplantning	Brudd initiering

2.7. Slagseighetstesting

2.7.1. Charpy Impact Test

Charpy slagseighets testing er en standardisert testmetode for å kunne dokumentere evnen til å oppta energien som trengs for å slå av en prøvestav ved ulike temperaturer. Det er vanlig at man benytter en prøvestav som enten har en U eller V kjerv.



Figur 18: Dimensjonene til en Charpy prøvestav med V-kjerv [25].

Figur 18 viser en standard prøvestav for slagseighetstesting. Det er maskinert inn en kjerv på den ene siden av staven. Figur 18 viser også standardmålene på prøvestaven.

Prøvestaven skal være 10x10x55mm og skal ha et V-spor med radien 0,25mm og en vinkel på 45°.

Charpy apparatet består av en pendel med kjent masse og lengde som slippes fra en kjent høyde. Prøvestaven legges ved ambolten. Pendelen slippes og treffer dermed materialet på baksiden av det maskinerte V-sporet. Energien som skal til for å slå av staven blir målt og måles i Joules (J) [S.3].

Charpy slagseighetstesting har flere fordeler sammenlignet med bruddseighetstesting. Prøvestaven er enkel å tilberede, metoden er rask og enkel samt kostnaden ved gjennomførelse er liten sammenlignet med bruddseighetstesting. Egenskapen som blir målt, kaller vi slagseighet eller slag arbeid.

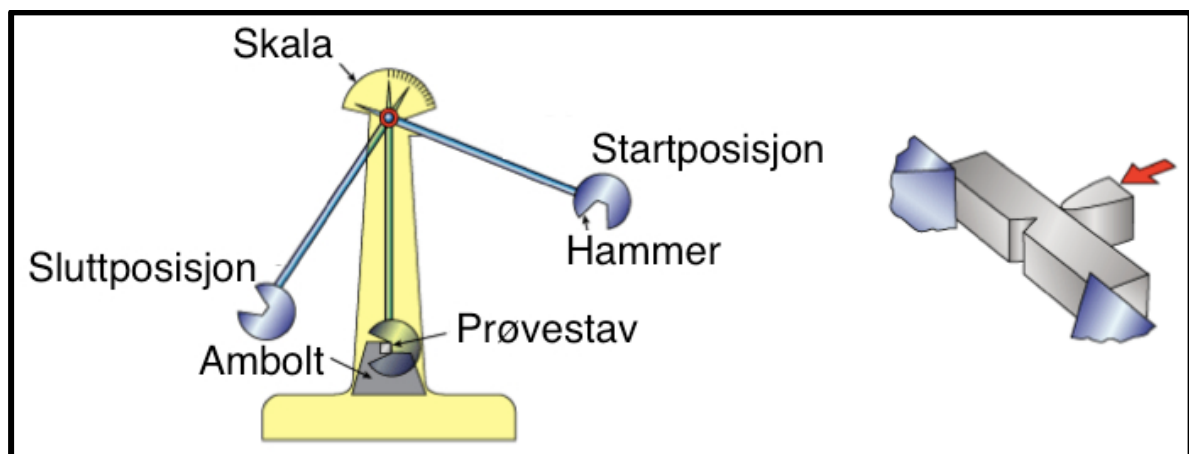
Hvis vi tar for oss slagseigheten for et ganske alminnelig konstruksjonsstål ved temperaturer rundt omslagsområdet ser vi at slagseigheten slår om fra høye til lave verdier innenfor et ganske smalt temperaturområde. Samtidig forandrer bruddene seg fra seige brudd med stor deformasjon til sprø brudd med liten eller ingen deformasjon. På grunn av forholdsvis stor spredning i prøveresultatene må det tas flere prøver ved hver temperatur og man må bruke middelveien. Resultatene blir tegnet opp i et diagram og man trekker en kurve gjennom punktene. Da får vi omslagkurven for stålet, som har en typisk S-form. S-kurver kan ofte karakteriseres matematisk på denne måten, også omtalt som "Logistic function" [27].

S-kurve:

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Omslagstemperaturen er den temperaturen som gir slagseighet på 27/28 Joules på en standard Charpy prøvestav.

Charpy slagseighetstesting er en veldig enkel og billig metode for bruddmekanisk testing. Den er veldig foretrukket fordi den er så lett å gjennomføre og fordi det er en anerkjent metode blant stålprodusenter.

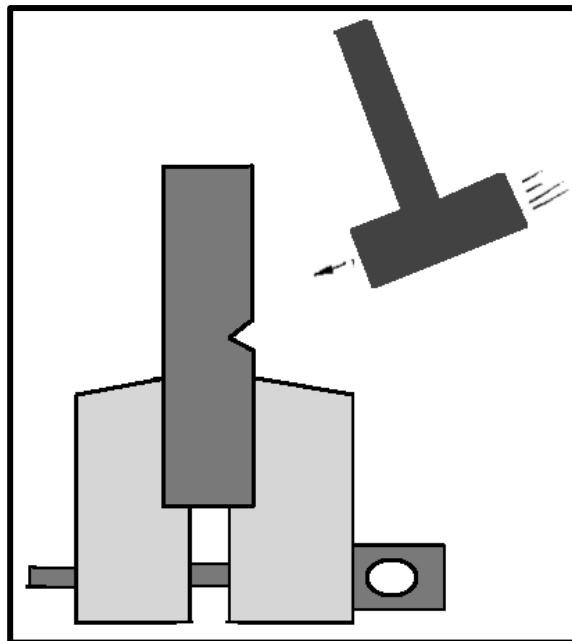


Figur 19: Standard Charpy pendelslagsapparat og prosedyren for hvordan prøvestaven skal slås av [17].

Det er et aspekt med Charpy slagseighetstesting man bør være observant på og det er at prøvestavene skal ha en V-kjerv som er 0,25mm i radien. En fres som tilfredsstiller dette kravet og som gir en radien på nøyaktig 0,25mm er svært kostbar og vanskelig å få tak i. Konsekvensene av dette er at mange velger å se bort fra nøyaktigheten ved denne radien som egentlig er en fastsatt standard.

2.7.2. Izod test

En Izod test er en annen metode for å finne slagenergien som skal til for å slå av en prøvestav. Izod test måler det samme som en Charpy slagseighetstest, og energien måles i Joules her også.

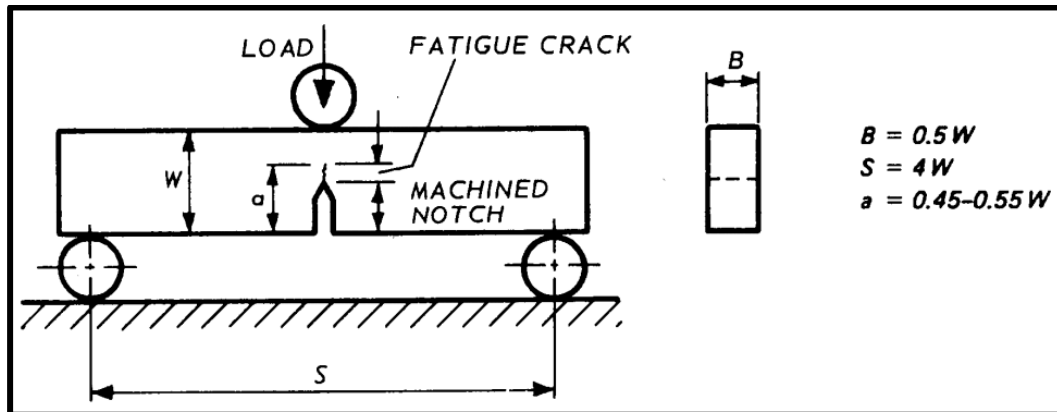


Figur 20: Bildet viser hvordan en standard Izod test gjennomføres.

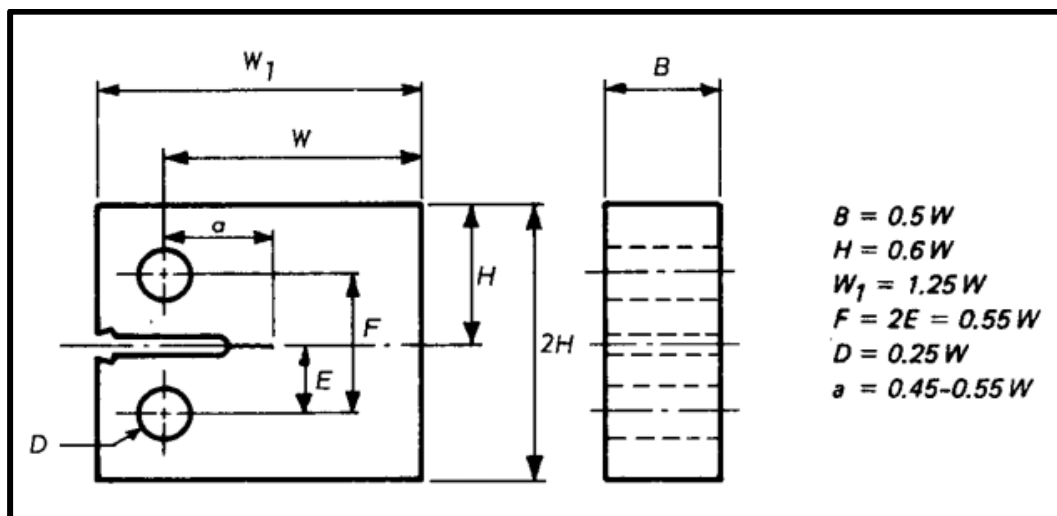
Forskjellen er at med en Izod test festes prøvestykket vertikalt istedenfor horisontalt. Pendelen slippes og treffer prøvestaven på den øvre halvdel av prøvestaven slik figur 20 viser.

2.8. Bruddseighetstesting

Bruddseighetstesting finnes ved hjelp av rektangulære prøvestaver i henhold til den Amerikanske Standarden ASTM 399, eller den Britiske Standarden BS 7448. Standardene har noen forskjellige detaljer i forhold til hverandre men er stort sett helt like. De vanligste rektangulære prøvestavene har en maskinert kjerv. I denne kjerven lages det en utmattingsprekk. Testen avsluttes ved at man belaster prøvestaven til brudd inntreffer. De to vanligste prøvelegemene er ”trepunkts bøyeprøve” og ”kompaktprøven” [S.7]. Trepunkts bøyeprøve kan også kalles for SENB (Single Edge Notch Bend) [20].



Figur 21: Trepunkts bøyeprøve eller SENB [S.7].

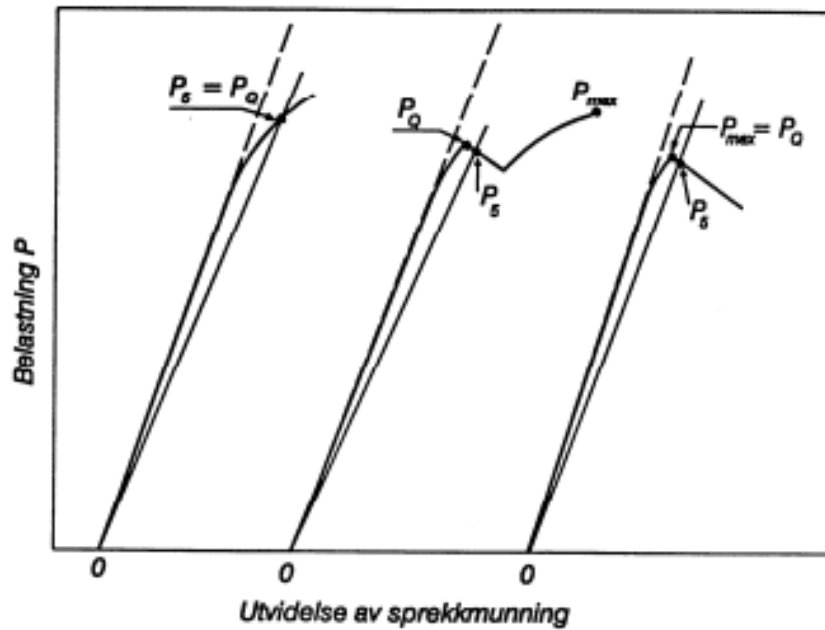


Figur 22: Kompaktprøven (CT-prøveemne) [S.7].

Sammenhørende verdier av tøyning montert over den maskinerte kjerven og kraft logges. Figur 23 viser tre forskjellige kurvetyper for sammenhengen mellom kraft og sprekutvidelse ved bruddseighetsprøving.

Type 1: Kraften for bestemmelse av bruddseigheten, P_Q , leses av som ordinaten til skjæringspunktet mellom kurven og en rett linje med stigning på 95% av stigningen til den lineære delen av kurven [S.7].

Type 2 og 3: Kurven får en maksimalverdi før skjæringspunktet med linjen med 95% stigning. P_Q blir da lik denne maksimalverdien [S.7].



Figur 23: Kraft versus utvidelse ved sprekkmunningen [S.7].

En bruddseighetstest måler motstanden et materiale har mot brudd etter at det er initiert en sprekk. En slik test vil kunne generere en enkelt verdi for bruddseigheten, eller en motstandskurve, hvor en parameterne K , J eller $CTOD$ er plottet mot sprekkforlengelsen.

2.8.1. Bruddseighets standarder

En rekke organisasjoner verden rundt har publisert en rekke standard prosedyrer for hvordan man skal utføre bruddseighetstesting. Disse organisasjonene er blant annet The American Society for Testing and Materials (ASTM), The British Standards Institution (BSI) og The International Institute of Standards (ISO).

En standardisert bruddseighetstest burde oppnå to sentrale mål:

1. Det skal sikre at den mengden som blir målt er reproduserbar og uavhengig av hvor det har blitt målt.
2. Det skal sikre at den mengden som blir målt er en fysisk egenskap og kan brukes i videre bruddmekaniske analyser.

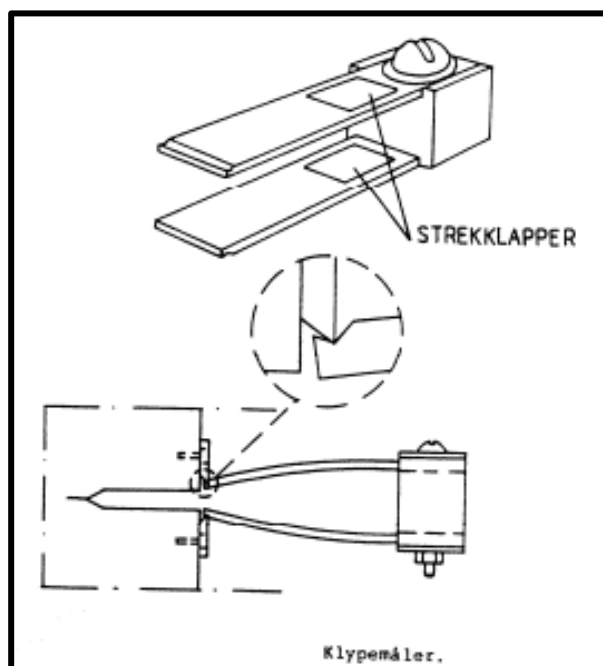
Målet med punkt 1. er å spesifisere testbetingelsene for å garantere en akseptabel grad av presisjon slik at resultatene vil være uavhengige av hvor de er gjennomført. Det vil si at det skal ikke spille noen rolle hvilket testfasilitet man har benyttet seg av. I enkel forstand, ønsker kravet å forsikre leverandørene og mottakerne om at det samme materiale har sammenlignbare resultater [S.5]. Standarden er med på at kjøp og salg av slike tjenester skal ha en viss standard og forsikre partene om at materialdataene er til å stole på og at det skal være en slags uavhengighet mellom testfasiliteter.

2.8.2. Crack Tip Opening Displacement (CTOD)

CTOD står for "Crack Tip Opening Displacement" og er en måte å måle bruddseighet på.

Prøvestykkene tas ut med full materialtykkelse, B. Midt på prøven maskineres en kjerv, og prøvestaven utsettes deretter for utmattingsbelastning slik at det dannes en utmattingsprekk fra kjervens spiss [S.8].

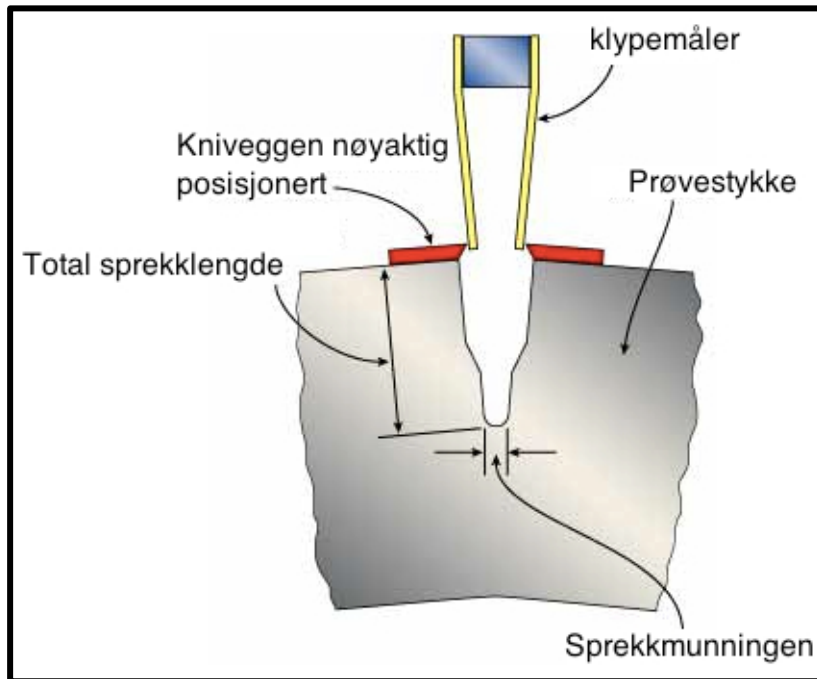
For å få målt åpningen, δ , som man kaller CTOD brukes det en såkalt klypemåler (clip gauge) som vist i figur 24. På hver side av den maskinerte kjerven er det montert kniver som feste for klypemåleren. Klypemåleren er to fjærer påmontert strekkklapper som registrerer sprekkåpningen, V_g [S.8].



Figur 24: Klypemåler med strekkklapper [S.8].

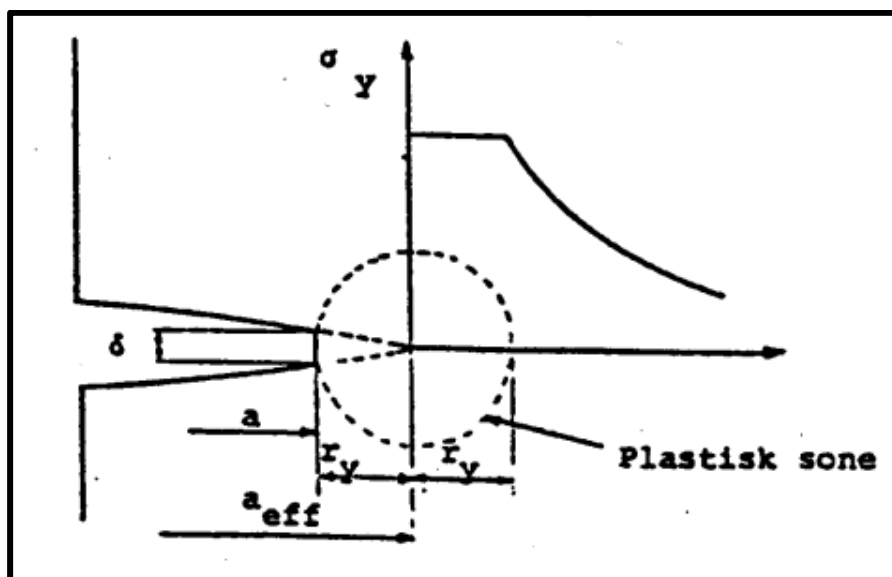
Etter at utmattingsprekken er laget utsettes prøvestaven for en økende trepunkts bøyebelastning, vanligvis ved laveste driftstemperatur. Avhengig av designfilosofien kan følgende CTOD verdier finnes:

- δ_i (mm): Sprekkåpning ved initiering av duktil sprekkvekst.
- δ_c (mm): Sprekkåpning enten ved:
 1. ustabil brudd
 2. pop-in, hvor duktil sprekkvekst ikke har forkommet
- δ_u (mm): Sprekkåpning enten ved:
 1. ustabil brudd eller
 2. pop-in, etter at man allerede har fått duktil sprekkvekst.
- δ_m (mm): Sprekkåpning ved maksimum last.



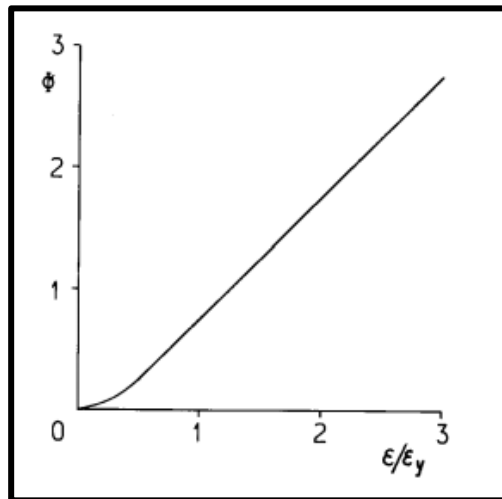
Figur 25: Slik festes klypemåleren [22].

De mest sikre og entydig definerte CTOD verdiene er δ_c og δ_i . Ved sprekkspissen vil spenningen bli over flytegrensen og plastisk deformasjon vil forekomme. Således er bruddet fremkommet av spenninger og plastiske tøyninger som overskrider bestemte verdier. Spenningen ved sprekkspissen vil alltid nå en kritisk verdi ved brudd. Det betyr at de plastiske tøyningene ved sprekkspissområdet som er bestemmende for bruddet. Et mål på den plastiske tøyningen ved sprekkspissen er åpningen av sprekkspissen. Dermed er det rimelig å anta at ved brudd har åpningen ved sprekkspissen (CTOD eller δ) en karakteristisk verdi, og kan derfor bli brukt som et bruddkriterium [S.8].



Figur 26: CTOD ved sprekkspiss [S.8].

Figur 27 viser designkurven for CTOD-metoden. Den modifiserte kurven viser dimensjoneringsparameteren ϕ som funksjon av ϵ/ϵ_{ys} og er den som blir benyttet.



Figur 27: CTOD designkurven [S.8].

Matematisk er kurven enkel:

$$\Phi = \frac{\delta_c}{2\pi\epsilon_{ys}a} = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{ys}}\right)^2 \quad (1)$$

Når: $\epsilon/\epsilon_{ys} \leq 0,5$

$$\Phi = \frac{\delta_c}{2\pi\epsilon_{ys}a} = \frac{\epsilon}{\epsilon_{ys}} - 0,25 \quad (2)$$

Når: $\epsilon/\epsilon_{ys} > 0,5$

Hvor:

ϵ : Tøyningen ved aktuell spenning.

ϵ_{ys} : Tøyningen ved flytegrensen.

δ_c : Kritisk CTOD.

Løser man likningen med hensyn på sprekk lengden, a , og setter man inn at relativ forlengelse ved flyting er $\epsilon_{ys} = R_e/E$, og relativ forlengelse ved spenning, σ , er $\epsilon = \sigma/E$, og vi får:

$$a = \frac{\delta_c \cdot E \cdot R_e}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^2} \quad (3)$$

Når: $\sigma/R_e \leq 0,5$

$$a = \frac{\delta_c \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot (\sigma - 0,25 \cdot R_e)} \quad (4)$$

Når: $\sigma/R_e \geq 0,5$

Design kurven har en innbygget sikkerhetsfaktor. Sprekk lengden, a , er dermed ikke den kritiske sprekk lengden, men representerer den største sprekk lengden som kan tillattes [S.8].

CTOD er en bruddmekanisk test som gir en kvantitativ verdi på et materialets bruddseighet. Verdien som CTOD gir kan benyttes til å bestemme en kritisk feil størrelse.

Prinsippet med CTOD – metoden går ut på at sprekk tøyningen beregnes og sammenlignes med en kritisk verdi ved sprekkinitiering (δ_i) eller ved sprøbrudd (δ_c) [S.8].

2.8.3. K_{IC} testing

K_{IC} testing brukes i standarden som heter ASTM E399, ”Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”, en Amerikansk Standard. K_{IC} brukes også i den Britiske Standarden BS 7448 [S.7]. K_{IC} brukes til å bestemme bruddseigheten av metalliske materialer som i vårt tilfelle da er konstruksjonsstål.

Dersom sprekken er gjennomgående, og platebredden stor i forhold til tykkelsen, som igjen er stor i forhold til sprekk lengden, har en funnet at:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

Ved endelig platebredde eller annen geometrisk utforming må formelen for faktoren K_1 korrigeres noe. I de fleste tilfeller innføres en korreksjonsfaktor ” f ” i formelen:

$$K_1 = f \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

Brudd oppstår når spenningsintensitetsfaktoren K_1 oppnår en kritisk verdi K_{IC} , som først og fremst er materialavhengig. Denne kritiske verdien betegnes som K_{IC} = bruddseighet, som er en material konstant under følgende forutsetninger:

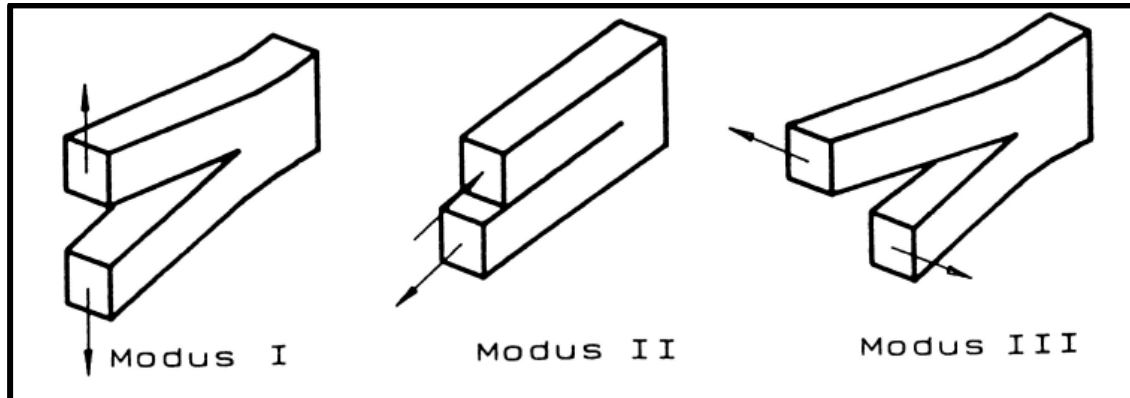
1. Stor materialtykkelse (plan tøyningstilstand ved sprekken).
2. Gitt temperatur.
3. Gitt deformasjonshastighet.

Bruddseigheten får benevnelsen $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ dersom spenningen settes inn i MPa og sprekk lengden settes inn i meter.

Ved å sammenligne K_1 med K_{IC} kan en finne ut om en sprekke er kritisk, det vil si om den medfører sprøbrudd i resten av tverrsnittet. Selv om en finner at risikoen i øyeblikket er minimal, er det all grunn til å være på vakt, ettersom sprekken gjerne vokser med tiden, og dermed kan nå kritisk størrelse. [S.7]

Materialtykkelsen spiller en betydelig rolle for bruddseigheten, dette er ytterligere forklart tidligere i rapporten.

Indeksen "I" i K_{1C} benevnelsen benyttes når belastningen er slik at den forsøker å slite sprekkflatene fra hverandre. Indeks "II" og "III" benyttes ved skjærbelastning over sprekken, som vist i figur 28. Det er det første belastningstilfellet med indeks "I" som er mest brukt [S.7].

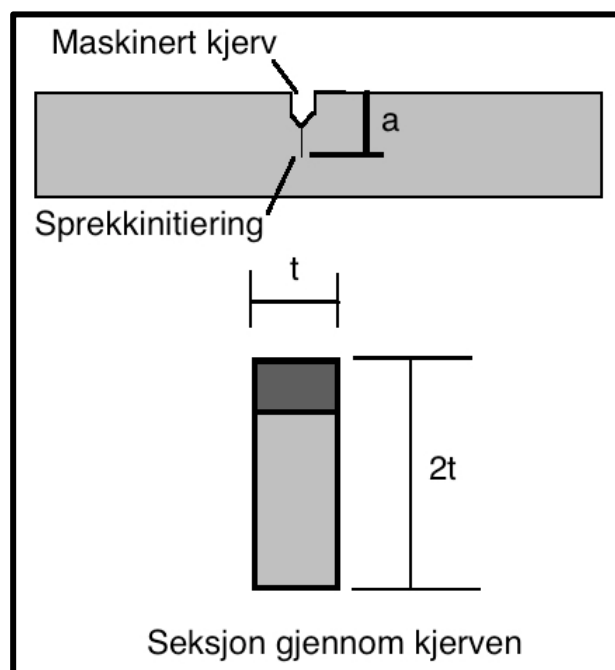


Figur 28: Belastningstyper [S.7].

For at man skal kunne benytte bruddseigheten K_{1C} som dimensjoneringsparameter ved gjennomgående sprekker stilles det blant annet krav til tykkelsen ved hjelp av følgende formel:

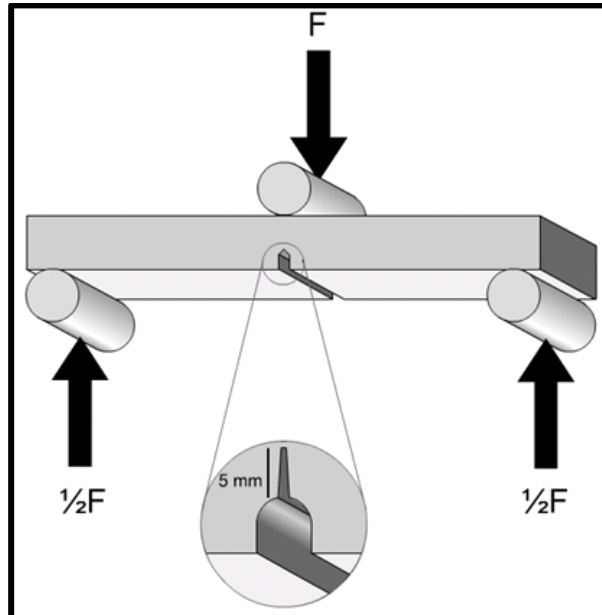
$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_{1C}}{R_e} \right)^2 \quad (7)$$

Hvor R_e er flytegrensen i MPa og B er tykkelsen i mm.
 Dette gjøres for å ivareta kravet om plan tøyning ved sprekkespissen.
 [S.7]



Figur 29: Typisk prøvestav for bruddseighetstesting. Viser at det er maskinert en kjerv med initiering til en sprekk.

Bruddseigheten finnes ved hjelp av rektangulære prøvestaver slik bildet i figur 29 viser. De vanligste rektangulære prøvestavene har en maskinert kjerv. I denne kjerven initieres det en utmattingsprekk. Testen avsluttes ved at man belaster prøvestaven til brudd inntreffer.



Figur 30: Viser hvordan en bruddseighetstest gjennomføres [10].

Figur 30 viser hvordan en bruddseighetstest gjennomføres. Ofte påføres det en kraft på motsatt side av kjervpåvirkningen. Prøvestykket legges på ved ambolten, slik at kraft er lik motkraft. I figur 30 kan man se at den initierte sprekken i dette tilfellet er 5mm.

2.9. Klassifisering av konstruksjonsstål

For stålmaterialer finner vi de felles europeiske betegnelsene i NS-EN 10027-1 og 2. Etter dette systemet kan vi betegne materialene på tre forskjellige måter:

1. Etter bruksområde og mekaniske egenskaper.
2. Etter kjemisk sammensetning.
3. Etter et nummersystem.

Stålbetegnelsen består av en bokstav som angir bruksområdet, etterfulgt av et tresifret tall som angir flytegrensen N/mm^2 . Etter dette tallet følger forskjellige tilleggs betegnelser. Vi har disse symbolene for ståltyper:

G	støpestål
S	konstruksjonsstål
P	Trykkbeholderstål
L	Stål for rørledninger
B	Armeringsstål
R	Stål for skinner
H	Kaldvalsede høyfaste plater
D	Plater for kaldforming
E	Maskinstål



HS Hurtigstål

Etter tallet kan det være føyd til tilleggs betegnelser som består av bokstaver og tall som uttrykker andre egenskaper. Et eksempel på en betegnelse er S235JO, som da betyr:

S Konstruksjonsstål
235 Minste flytegrense i N/mm^2
JO Krav til slagseighet er 27/28 J ved 0°C

Stål beregnet for sveising er det mest brukte av konstruksjonsstålene. De er standardiserte i NS-EN 10025, som inneholder tre hovedkvaliteter: S235, S275 og S355. S står for "structural steel", som på norsk betyr konstruksjonsstål. Tilleggsbetegnelse etter tallet for flytegrensen betyr:

- JR = basisstål
- JO = kvalitetsstål
- J2 = angir krav til slagseighet

[S.3]

Det Norske Veritas (DNV) har egne standarder. Veritas stålene "Normal Strength Steels" med betegnelse NVA, NVB, NVD og NVE hører også med til de vanlige konstruksjonsstålene. De har flytegrensekrav $R_{eH} = 235\text{N}/\text{mm}^2$. Bokstavene A, B, D og E angir forskjellige krav til tetningsgrad, analyser og prøvetemperatur ved slagprøving. Prøvetemperaturen varierer fra 0 til -40°C . [S.13]

Stålets klassifisering og merking av stål er viktig for å forsikre kjøperen om at stålet har de styrkeegenskapene det skal ha. Merking av stål sier noe om minimum spesifisert flytegrense, spesifisert slagseighet ved ulike temperaturer og leveringstilstand. Dette er veldig essensielt når man skal se på bruddseigheten og slagseigheten til materialet. [S.13]

Stålet klassifiseres i NS-EN 10025-1 ved S xxx yy zz:

Klassifisering	Betydning
xxx	Minimum spesifisert flytegrense
yy	Spesifisert slagseighet: - JR = 27 J ved romtemperatur - JO = 27 J ved 0°C - J2 = 27 J ved -20°C - K2 = 40 J ved -20°C
zz	Leveringstilstand: - FU = Utettet stål - FN = Utettet stål ikke tillatt - FF = Tettet stål

Normaliserte finkornstål er spesifisert i NS-EN 10025-3, S xxx y z:

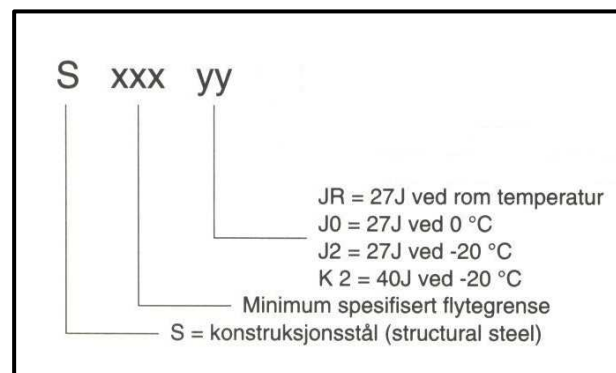
Klassifisering	Betydning
y	Leveringstilstand
N	Spesifisert slagseighet ved temperatur ikke mindre enn -20 °C
NL	Spesifisert slagseighet ved temperatur ikke mindre enn -50°C

Termomekanisk valset stål spesifisert i NS-EN 10025-4:

Slagseighet verifisert i henhold til NS-EN 10025-1. I tillegg skal slagseighetsprøver utføres på langsprøved ved:

Klassifisering	Betydning
M	Slagseighet spesifisert ved -20°C
ML	Slagseighet spesifisert ved -50°C

[S.14]



Figur 31: Viser hva de ulike materialbetegnelsene betyr [S.15].

Tabell 6: Oversikt over tilleggs symboler for slagseighet [S.13].

Slagseighet i Joule			Prøvetemperatur
27 J	40 J	60 J	°C
JR	KR	LR	20
JO	KO	LO	0
J2	K2	L2	-20
J3	K3	L3	-30
J4	K4	L4	-40
J5	K5	L5	-50
J6	K6	L6	-60



2.10. Standardisering

Standardisering blir bare mer og mer viktig. Derfor har man utviklet standarder for å kunne skille mellom materialbetegnelser og materialkvaliteter. Det er utarbeidet nasjonale og internasjonale standarder. Disse standardene stiller krav til materialene og angir også hvordan vi skal måle og kontrollere materialeegenskapene [S.3]. Industriland utgir nasjonale standarder, og i Norge er det Norges Standardiseringsforbund som utgir Norsk Standard (NS). I EU- og EØS området blir det fastsatt EN-standarder, som må utgis som nasjonale standarder i de forskjellige medlemslandene. For Norges vedkommende heter de internasjonale standardene NS-EN eller NS-ISO [S.3].

Viktige utenlandske standarder er:

- SS (SIS) Svensk Standard
- DIN Deutsche Industrie Norm
- BS British Standard
- AISI American Iron and Steel Institute
- ASTM American Society of Testing and Materials
- ISO International Standardization Organization, som leder og koordinerer internasjonalt standardiseringsarbeid

[S.3]

3. Charpy – Bruddseighets korrelasjoner

Det finnes utallige korrelasjoner mellom Charpy slagseighet og bruddseighet og det er vanskelig å skaffe seg et fullstendig oversiktsbilde over alle sammen. Jeg kommer heller ikke til å dekke alle korrelasjonsteknikkene som eksisterer innenfor denne rapporten. Som begrensning har jeg valgt å ha et hovedfokus på de korrelasjonsteknikkene som er presentert i den Britiske Standarden BS 7910 og beskrevet i SINTAP rapporten [S.2]. Men jeg kommer til å presentere og gi en oversikt over noen av de andre estimeringsteknikkene som eksisterer i tillegg. Mye av den informasjonen som er presentert i dette kapitlet stammer fra en av SINTAP rapportene som heter ”SINTAP Task 3 Status Review” [S.10].

Veldig ofte så er situasjonen slik at den som skal bruke Charpy slagseighetsverdier til videre bruddmekanisk analyse kun har én slagseighetsverdi oppgitt ved én gitt temperatur. Dette sier oss veldig lite om materialegenskapene, derfor skaper det ofte hodebry og gjør det vanskelig for den ingeniøren som ønsker å benytte seg av dem. Å velge riktig korrelasjon med tanke på det enorme spekteret av ulike materialtyper, ulike tilnærminger og ikke minst begrenset tilgang på fullstendig materialdata er ofte vanskelig. Ofte kan selve utfordringen alene ligge i å oppdrive materialbetingelsene, hvordan materialet er behandlet, og ikke minst tilgang på en komplett Charpy slagseighetskurve for stålet med nok slagseighetsverdier.

3.1. Industrielle problemer og utfordringer

Bruddmekaniske analyser krever veldig ofte kjennskap til bruddseigheten til et materiale i form av enten K , CTOD eller J . Det mest ideelle er alltid å gjennomføre fullstendige bruddmekaniske tester [S.10]. Dette er den definitivt beste og sikreste måten å tilegne seg bruddseighetsverdier på. Det sier seg selv at det er bedre å ha den reelle målte verdien enn bare et estimat. Et estimat bringer i mange tilfeller med seg usikkerheter.

I mange tilfeller kan man dessverre ikke like enkelt gjennomføre slike bruddmekaniske tester i praksis. Det kan være mange årsaker til at dette ikke er så lett. Årsakene kan blant annet være at materialverdiene som trengs rett og slett er utilgjengelig eller utilstrekkelig for brukeren og derfor ikke egnet til videre analyse og bruk. Eller det er rett og slett ikke mulig å fjerne en bit av selve materialet fra strukturen/bygningen som man trenger for å få gjennomført de nødvendige bruddmekaniske testene. Det å lage en replika av et stort materiale kan være veldig vanskelig. Til slutt kan det også være så enkelt som at det er på grunn av økonomiske årsaker, at man rett og slett ikke har økonomien til å gjennomføre testene som trengs.

Det er i slike tilfeller som dette at det er veldig nyttig å kunne benytte seg av korrelasjonsformler for å regne seg frem til et estimat av bruddseigheten. Dersom målinger som Charpy slagseighet er kjent, så er det mulig å estimere bruddseigheten ved bruk disse estimeringsteknikkene. Estimaten av bruddseigheten kan så anvendes og brukes til videre bruddmekaniske analyser og innenfor skade tolerant design. Grunnen til at dette er sett på som så lukrativt er fordi Charpy slagseighet oftere er tilgjengelig og enklere å oppdrive. Som nevnt tidligere er Charpy en anerkjent

testmetode og den brukes ofte som en kvalitets kontroll for en rekke ulike materialer. Man kan altså si at Charpy er anerkjent innenfor material testing [S.10].

Sikker bruk av korrelasjoner mellom Charpy slagseighet og bruddseighet er ikke alltid like lett og dette ses på som en av de største utfordringene [S.10]. Selve bruken og anvendelsen av estimeringsteknikkene skaper hodebry for den ingeniøren som skal prøve å benytte seg av dem. Det finnes utallige materialtyper, sammensetninger, applikasjoner og anvendelsesmetoder som kompliserer valg av riktig korrelasjon og formel. Valg av estimeringsteknikk er ofte den største utfordringen fordi det ofte er begrenset med tilgjengelig informasjon og materialdata som man trenger, som for eksempel at det er for få Charpy slagseighetsverdier oppgitt.

Ofte så er det kun én Charpy verdi ved én gitt temperatur som er tilgjengelig for den som skal benytte seg av estimeringsteknikkene. Spørsmålet er derfor ikke om disse korrelasjonsmetodene er anvendbare i praksis, men selve utfordringen ligger heller i hvilken korrelasjonsmetode skal velges når og hva er dens begrensninger.

Det finnes mange publiserte korrelasjoner der ute, og det er vanskelig å få tilstrekkelig oversikt over dem alle. Dessverre er det slik at ikke alle er like anvendbare, noen av dem er faktisk verken verifisert eller validert [S.10]. Det er sagt at bare noen få av dem er ansett til å være på konservativ side og som gir et konsekvent konservativt estimat. Innenfor skade tolerant design der sikkerhet er det viktigste aspektet er det veldig viktig at man havner på konservativ side dersom man skal ha et estimat av bruddseigheten. Igjen roper dette et varsko om forsiktig bruk og varsomhet. Man burde være så sikker som mulig på at man får et konservativt estimat av bruddseigheten før man bruker disse estimatene til videre analyse.

Selv om mange av de estimeringsteknikkene som eksisterer har det samme matematiske uttrykket, og konsekvent gir sammenlignbare resultater, er problemet at det finnes så utallig mange forskjellige varianter av disse formlene [S.10]. Selve utfordringen ligger i å velge den riktige, anvende den på korrekt vis og havne innenfor et konservativt estimat. For å opparbeide tillitt til bruken av korrelasjonsformlene er man avhengig av videre forskning, valideringer og statistiske analyser. [S.10]

En av de utfordringene som oppstår er av hvilken grad Charpy slagseigheten er oppgitt og hvor mye av slagseighetskurven har man tilgjengelig. Materialdataene som man har tilgjengelig kan variere i stor grad og det finnes mange ulike typer former som Charpy data kan oppstå. Dette kompliserer valg av riktig korrelasjonsmetode betraktelig. Det betyr at jo mer informasjon om Charpy slagseighet og jo flere verdier man har desto bedre og enklere blir det å anvende korrelasjonsformlene på riktig måte og ikke minst få konservative estimater på bruddseigheten.

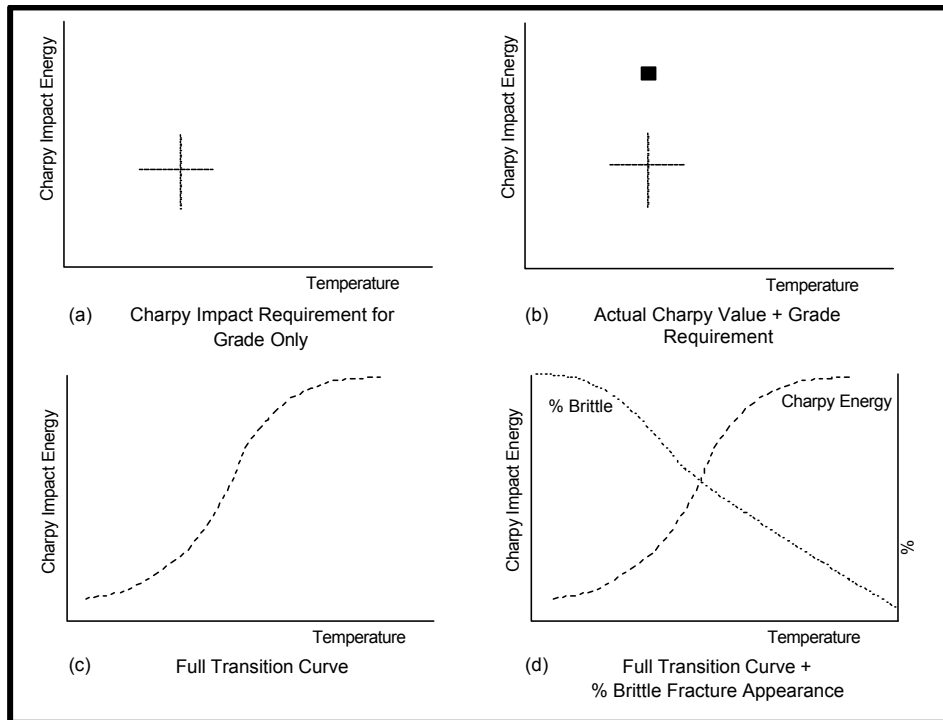
For sveiste sammensetninger er utfordringene enda større. Dette er på grunn av den komplekse natur som forekommer i sveiste skjøter. Tykke seksjoner som er sveist sammen, inneholder mange ulike mikrostrukturer og dermed et stort spekter av ulike materialegenskaper [S.10]. Dette gjør det bare enda vanskeligere å tilegne seg nok informasjon om materialet man ønsker å estimere bruddseigheten på.

[S.10]

3.2. Ulike typer Charpy data

Den største utfordringen rundt bruddmekaniske analyser er tilgjengeligheten av input data som Charpy slagseighetsverdier. Bruddseighetsverdier er som oftest den parameteren som er minst kjent og tilgjengelig for allmennheten. Men selv om Charpy slagseighetsverdier er kjent og tilgjengelig for den som trenger det, er det formatet av disse dataene som avgjør hvor nyttig den er.

Charpy slagseighet for materialer vil som oftest fremstå i en av fire ulike former. Disse fire måtene Charpy slagseighetsverdier kan fremstå på er vist i figur 32.



Figur 32: Viser de fire ulike måtene Charpy slagseighetsverdier kan oppstå [S.2].

De ulike typene som vist ovenfor er:

- At materialet har tilfredsstillt Charpy kravet av en hvis grad. (En gitt verdi av joule (J) ved en bestemt temperatur (T) i grader ($^{\circ}\text{C}$).
- Test sertifikat som viser den faktiske Charpy energien og test temperaturen. (Gjerne gjennomført med 3 repeterende forsøk)
- En fullstendig Charpy omslagskurve for stål.
- En fullstendig Charpy omslagskurve sammen med en prosentvis oppstandelse av sprøbrudd.

Punktene over er rangert fra lavest til høyest nytteverdi for egnet bruk i korrelasjonsformlene. Punkt a. representerer den laveste nytteverdien av Charpy slagseighet som man kan benytte, og punkt d. representerer den med høyest nytteverdi til bruk i estimeringsformlene [S.2].

Når man har tilgang til hele omslagskurven for materialet, tilsier jo dette at det er de mest verdifulle Charpy slagseighets verdiene man kan ha. Dermed vet man hvordan materialet oppfører seg langs hele kurven og ved alle temperaturene materialet har

blitt testet ved. Kort oppsummert vil det si at jo mer informasjon rundt Charpy slagseighetsverdier man har, desto enklere er det å velge riktig korrelasjonsformel og sikrere er man på å få et godt estimat av bruddseigheten.

Siden det finnes så mange forskjellige måter Charpy verdier kan være oppgitt på betyr dette at det trengs flere korrelasjonsformler. Disse korrelasjonene må tillate fleksibilitet avhengig av hva slags type slagseighetsverdier man har til rådighet [S.10]. Derfor er det essensielt at det er en rekke korrelasjoner tilgjengelig for brukeren. Utfordringene ligger i å velge riktig korrelasjon. Ved kun å benytte seg av en form for korrelasjonsmetode vil ikke dette gi så veldig mye utbytte for brukeren. Det essensielle ved valg av korrelasjonsmetoder faller på de verdiene man har tilgjengelig på forhånd.

Som nevnt tidligere er det enda vanskeligere å velge korrelasjonsmetode for sveiste materialer. I sveiste forbindelser er det en rekke ulike mikrostrukturer som oppstår. Dette gjør sitt til at det fremstår flere materialeegenskaper på samme sted, og disse kan være veldig temperatur avhengig [S.10]. I tillegg er bruddseighet påvirket av tykkelse, sprekke størrelse og ikke minst posisjonen av sprekken. Problematikken for sveiste forbindelser er at de aller fleste korrelasjonsmetodene er basert for vanlige materialer og det er bare et fåtall av dem som er brukbare på HAZ eller sveiste forbindelser [S.10].

[S.10]

3.3. Nåværende status og tilnærminger

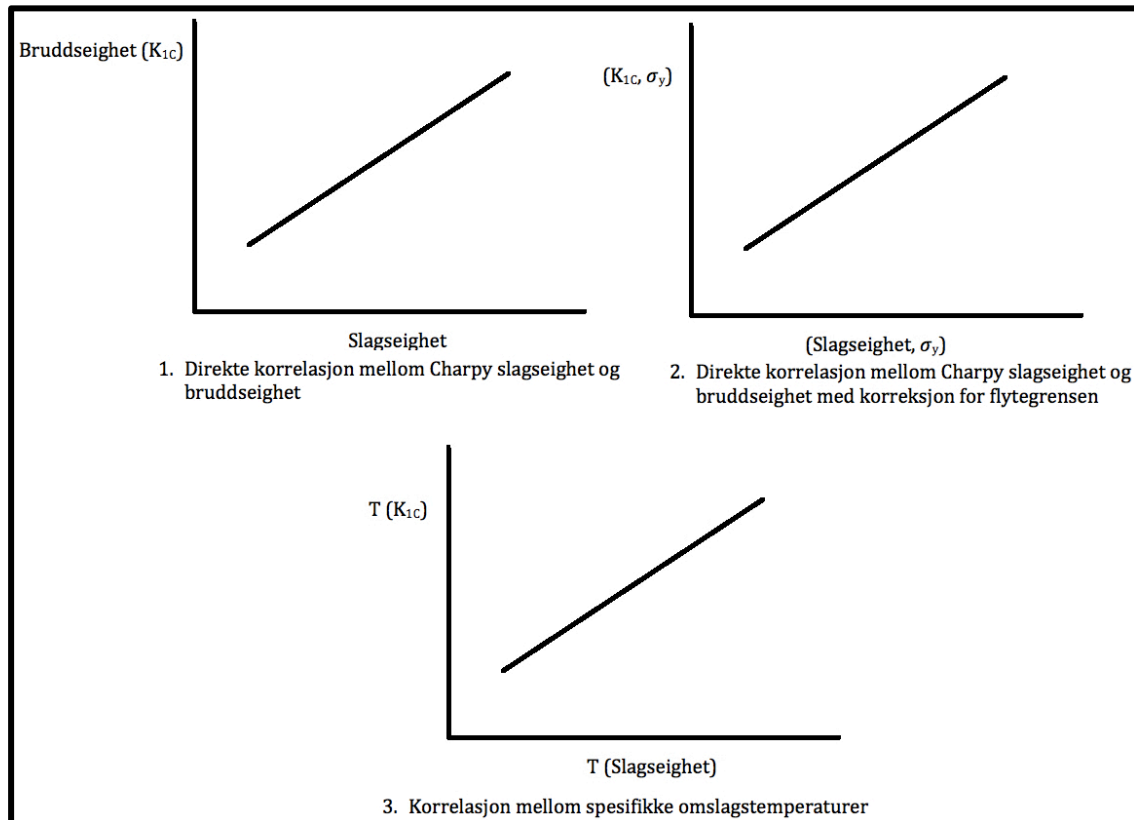
Et større antall korrelasjoner har blitt utviklet og publisert for en rekke ulike materialtyper. Noen er spesifikke for en materialtype, mens andre er brukervennlige for flere ulike typer materialer. En fullstendig oversikt over noen av de ulike eksisterende og publiserte korrelasjoner er presentert senere i denne rapporten.

Prinsipielt så er det tre essensielle tilnærminger for bruk av Charpy - Bruddseighets korrelasjoner, og disse er som følger:

1. Direkte korrelasjon mellom Charpy slagseighet og bruddseighet.
2. Direkte korrelasjon mellom Charpy slagseighet og bruddseighet med hensyn til flytegrensen.
3. Korrelasjon mellom spesifikke omslagstemperaturer.

[S.10]

Disse tre tilnærmingene er vist i figur 33.



Figur 33: Tre typer generiske korrelasjonsformer [S.10].

Følgende anbefalinger er gitt innenfor skade tolerant design:

1. Korrelasjoner må brukes med stor varsomhet og forsiktighet, spesielt ved vurdering av sikkerhetskritiske aspekter som skal brukes innen skade tolerant design.
2. Vurderinger som brukes i bruddmekaniske analyser som er basert på korrelasjoner bør muligens omfatte en ytterligere sikkerhetsfaktor [S.10].
3. Der det er mulig og lar seg gjøre, bør estimater fra korrelasjoner godkjennes gjennom bruddmekanisk testing.

[S.10]

3.4. Potensielle problemer med korrelasjonene

3.4.1. Forskjeller i testmetoder

En sammenligning av Charpy slagseighetstest og en bruddseighetstest markerer flere viktige forskjeller på flere områder. Forskjeller mellom dem er oppsummert her:

- Bruddseighetsprøver har prefabrikkerte sprekker, mens Charpy prøver har en V-kjerv med en radie på 0,25mm uten sprekk.
- Det er vanlig at man benytter seg av en prøve med full tykkelse under en bruddseighetstest, mens for Charpy prøver bruker man små definerte prøvestaver som er 10x10x55mm.
- Bruddseighet er vanligvis målt kvasi-statisk ved lav tøyning, mens Charpy slagseighet er målt under innvirkning av omgivelser ved høy tøyning.

- En Charpy test er lettere gjennomførbar enn en bruddseighetstest. Å gjennomføre en bruddseighetstest er ofte ansett som mer avansert og mer komplisert enn en Charpy test.
- Kostnaden ved å gjennomføre en bruddseighetstest er vesentlig høyere enn en Charpy test.
- Generell ekspertise ved gjennomførelse av en Charpy test er vesentlig høyere enn ved bruddseighetstest.

[S.10]

3.4.2. Produksjons endringer for konstruksjonsstål

Verden er stadig i forandring, og det er konstruksjonsstål også. Det forekommer stadig forbedringer i prosesserings og produksjons metoder og over de siste 20 årene har det forekommet enorme fremskritt [S.10]. Som et resultat av dette har konstruksjonsstål i dag fått bedre sammensetning, det inneholder mindre legeringselementer og det har fått finere kornstørrelse. Konstruksjonsstål er stadig i utvikling og forbedring.

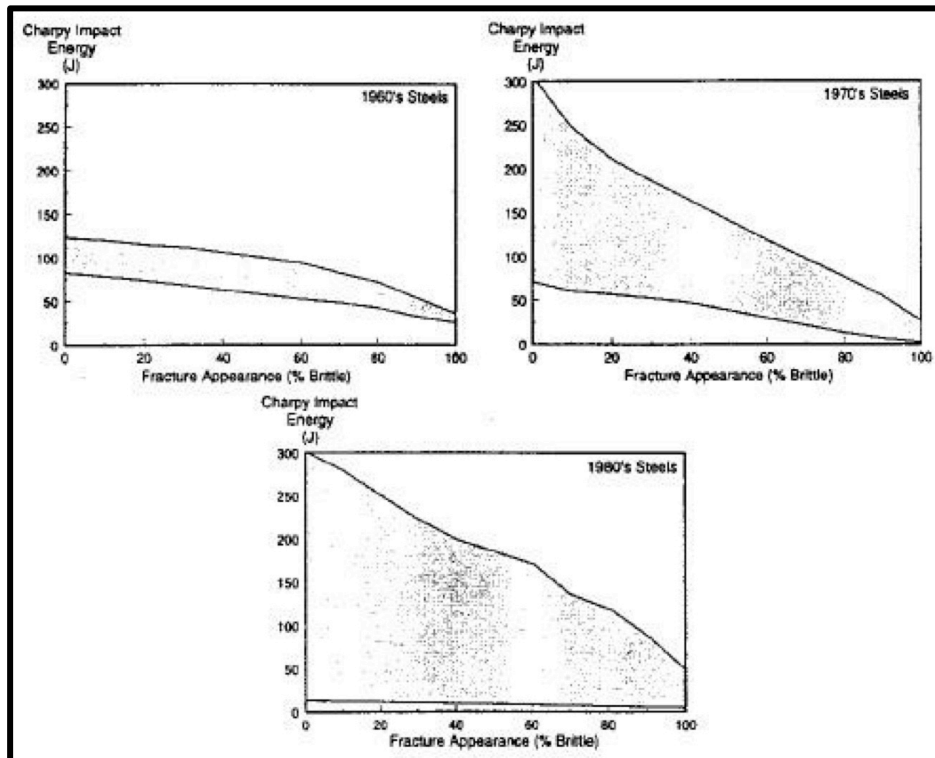
Konsekvensen av dette er at stålet oppfører seg annerledes i dag enn tidligere. Dette gir nye problemer og utfordringer for valg av riktig korrelasjonsmetode [S.10]. Man kan ikke lenger anta de samme forutsetningene som tidligere. Nyere produsert konstruksjonsstål har helt andre Charpy slagseighetsverdier og en annen omslagskurve i forhold til eldre typer stål av samme sammensetning. Omslagsområdet forandrer seg både for slagseigheten og for bruddseigheten.

Resultatet av dette er at legerte konstruksjonsstål har blitt mye bedre opp gjennom tidene, og da spesielt over de siste 20 årene [S.10]. Konsekvensen av dette har ført til at de nye konstruksjonsstålene har:

- Lavere Charpy omslagstemperaturer.
- Et smalere spekter for omslagstemperaturen.
- Høyere øvre grense verdier.
- Mindre korrelasjon mellom Charpy slagseighet.
- Høyere Charpy energi for en gitt prosentvis krystallinitet.
- Høyere Charpy energi assosiert med brudd initiering.
- Ulike posisjoner for Charpy og bruddseighets omslagskurver.

Forandringen på forholdet mellom Charpy energi og prosentvis krystallinitet for konstruksjonsstål de siste 20 årene er vist i figur 34. Moderne produksjon av stål har bedret både slagseigheten og bruddseigheten [S.10].

Dette påpeker bare hvor viktig det er å ta hensyn til sammensetning, produksjonsår og forholdene rundt produksjon av konstruksjonsstål når man skal velge korrelasjonsmetode. Betydningen av merking av stål og standardisering blir vesentlig viktigere. Det er derfor veldig viktig at man er helt sikker på hva slags stål man har med å gjøre, og det gjelder i alle tilfeller, ikke bare under valg av korrelasjonsmetode. [S.10]



Figur 34: Forandringen på Charpy verdier siden 1960-tallet [S.10].

3.4.3. Fasong på omslagskurven

Problematikken rundt at det ikke finnes en eksakt korrelasjonsformel for hele omslagsområdet til stål kompliserer bruken av formlene drastisk. Det er kun korrelasjonsmetoder som tar hensyn til skift i temperaturen som samsvarer til dette [S.10][S.2]. Det betyr også at disse korrelasjonene kun gir et estimat av bruddseigheten innenfor et visst område på omslagskurven. Grunnen til dette er tilbake til det at korrelasjonsmetodene er delt inn i tre områder, det nedre grense område, omslagsområde og tilslutt det øvre grense område.

Definisjon av disse tre områdene på omslagskurven er et potensielt problem og en utfordring å definere [S.2]. Definisjon basert på prosentvis krystallinitet kan føre til forskjellige definisjoner for forskjellige konstruksjonsstål [S.10].

[S.10]

3.4.4. Estimering av Charpy og bruddseighets verdier ved ulike temperaturer

Når en Charpy verdi, eller bruddseighetsverdi er kjent ved en temperatur er det ofte nyttig å kunne estimere en ekvivalent verdi ved en annen temperatur. Dette er ytterligere og mer detaljert forklart under kapittel 6, bestemmelse av Charpy 27/28 Joules.

3.4.5. Forholdet mellom parameterne til bruddseighet

Charpy bruddseighets korrelasjoner i litteraturen er basert på bruddseighets parametere som K , CTOD og J [S.2]. Stål type, temperatur og tykkelse har innvirkning på utfallet av parameteren. Faktorer som påvirker forholdet mellom disse tre parameterne er:

1. Standarden på bruddseighetstesten.
2. Type test resultat.
3. Begrensninger.

[S.10]

Dette er ytterligere forklart senere i rapporten under kapittel 7. K -verdi tilnærming.

3.4.6. Tykkelseeffekt

En standard Charpy prøvestav har standard dimensjoner, det har ikke en bruddseighetsprøve. En bruddseighets test har ikke noe spesielt forhold til tykkelse utenom de anbefalte dimensjonene for CTOD tester.

Tykkelseeffekt på K_{1C} kan uttrykkes på denne måten:

$$(K_{1C})^2 B = \textit{konstant}$$

Hvor B = prøve tykkelsen.

Siden $\delta = K^2$, er uttrykket for CTOD som følger:

$$\delta^2 B = \textit{konstant}$$

Det er viktig for alle typer korrelasjoner at tykkelseeffekt på bruddseighet er med på å normalisere resultatene [S.10]. Hvis man ikke tar hensyn til tykkelseeffekten øker man sensitiviteten til bruddseigheten, og det er større fare for at man får mindre nytte av korrelasjonene.

[S.10]

3.4.7. Statistiske analyser

Bruken av statistiske metoder for å se om man havner på konservativ side ved bruk av korrelasjoner er et nyttig aspekt. Dersom man kan få statistisk tillitt til at estimatene for bruddseighet faktisk stemmer og at man konsekvent havner på konservativ side, så er dette absolutt fordelaktig. Dette vil ha en enorm påvirkning for videreutvikling av korrelasjoner mellom slagseighet og bruddseighet [S.10]. Noe av utfordringen med denne rapporten har vært å finne slike statistiske analyser som underbygger bruken av estimeringsteknikkene.

3.5. Industrielle krav

De prinsipielle utfordringene ved bruk av Charpy – bruddseighets korrelasjoner i industrielle sammenhenger er:

- Begrenset tilgang på slagseighetsverdier.
- Usikkerhet rundt gyldighetsområdet for en bestemt korrelasjon.
- Valg av den beste korrelasjonen ut fra de data som man har tilgjengelig.
- Opparbeide tillitt til en bestemt korrelasjon.
- Ta hensyn til stål type (sammensetning, produksjonsår, merking osv) ved bruk korrelasjonen.
- Ta hensyn til tykkelseeffekt.
- At man forsikrer seg om at man havner innenfor konservativ side på estimatene.
- Validering.

Det er derfor foreslått tre alternativer å velge mellom avhengig av hvor mye data man har tilgjengelig. Disse er som følger:

1. Direkte korrelasjon mellom Charpy og bruddseighet; å bli brukt for svært begrenset data tilgjengelighet og til å representere et konsekvent konservativt estimat for bruddseighet, en for den nedre grensen og en for den øvre grensen.
2. Direkte korrelasjon mellom Charpy og bruddseighet men med variable korrelasjons parametere for å ta hensyn til effekt av stål type, strekkegenskaper og sammensetning; en for den nedre grensen og en for den øvre grensen. Metoden burde tillate konvertering mellom K, J og CTOD.
3. Korrelasjon basert på forholdet mellom omslagstemperatur for Charpy på 27/28 Joules og $K = 100 \text{ MPa}\sqrt{m}$ som omfatter justering for tykkelse, temperatur og bruddsannsynlighet.

[S.10]

3.6. Eurokode 3

Ved utviklingen av Eurokode 3, trengtes det en metode for korrelasjon mellom Charpy slagseighet og bruddseighet [S.10]. På grunn av forskjellene mellom Charpy og bruddseighet var en direkte korrelasjon upassende i dette tilfellet. En referanse temperatur for både Charpy og bruddseighet på deres omslagskurver var derfor valgt. Charpy verdien ved referanse temperaturen burde korrespondere til den økende delen av omslagskurven. Bruddseighetens referanse temperatur burde være lav nok til å utelukke duktilt brudd og eliminere effekter fra omfattende plastisitet [S.10]. Temperaturene som ble valgt er for slagseighet ved 27/28 Joules ($T_{27/28 J}$) og for bruddseighet $K_{1C} = 100 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

Korrelasjonens form er som følger:

$$TK_{1C}100 = a TC_{v28J} + b [^{\circ}C]$$

K_{IC} har blitt modifisert, bruddseighets verdiene er tykkelses korrigerert for $B = 25\text{mm}$, mens a og b er konstanter.

[S.10]

3.7. Arktiske strøk

Noe av årsaken til at nettopp disse korrelasjonsformlene er spesielt interessante for Norge er på grunn av olje og gass virksomheten vi har offshore. I fremtiden vil det bli satset mer og mer på olje og gass som ligger offshore og ikke minst i gravgrendte strøk som for eksempel i Arktis.

For øyeblikket flytter leting etter olje og gass seg til dypere og mer krevende steder som har tøffere klima. Det sies at på havbunnen i Arktis kan det ligge opp mot 30% av verdens uoppdagede gassreserver og 13% av verdens uoppdagede olje [S.17]. Et røft estimat sier at det kan være opp mot 400 milliarder fat olje under havbunden i Arktis. I disse områdene er det ekstreme værforhold og temperaturen kan falle helt ned mot -40°C , og en såkalt design temperatur innen skade tolerant design helt nede på -60°C kan ofte være påkrevd [S.17]. Dette gir enorme utfordringer for de materialene som skal brukes og i de aller fleste tilfeller så er det konstruksjonsstål som fortsatt blir brukt [S.17]. Det Norske Veritas har flere prosjekter som ser på dette og jeg har vært så heldig å få tilgang til noen dokumenter som omtaler bruddseighet i Arktiske områder.

Under slike forhold blir estimering av bruddseighet stadig mer viktig. Dette understreker at bruddseighet innen skade tolerant design er et veldig viktig tema også i dag. Ikke minst for Norge som har så mange virksomheter som lever nettopp av å finne olje og gass. Konsekvensene blir også større når man jobber under svært sårbare omgivelser og en ulykke vil kunne få fatale konsekvenser for miljøet og dyreliv.

3.8. Fremtidig arbeid

Korrelasjonsformlene er stadig i utvikling og det kommer stadig forbedringer på både formelene og på måten de skal anvendes på. Dette er et fagfelt som er i stor utvikling og det skjer stadig forbedringer. De fremtidige utfordringene ligger i å få tilstrekkelig oversikt og få opparbeidet større tillitt til formelene slik at de lettere kan benyttes i praksis.

Dette er et nokså snevert fagfelt og det er vanskelig å tilegne seg tilstrekkelig oversikt over hva som finnes og hva som har vært brukt tidligere. I fremtiden ser jeg for meg at det vil finnes flere lærebøker som omtaler dette temaet mer grundig og at det skal være enklere å få fatt i eksempler som viser bruken av korrelasjonsformlene i reelle problemstillinger.

Arbeidet innen SINTAP er fortsatt under utvikling og de har som mål å etablere en Europeisk prosedyre innen skade tolerant design for allmennheten og for den praktiske brukeren [S.18].

4. Utvalg av korrelasjoner

På grunn av fasongen på omslagskurven for stål finnes det ingen korrelasjon som kan brukes for hele kurven. Hvilken korrelasjon man skal bruke avhenger derfor av hvilke type slagseighetsverdier man har tilgjengelig. Derfor er omslagskurven delt inn i tre områder, et nedre grense område for det sprø område, et omslagsområde og et øvre grense område for det seige område. Hvert område på omslagskurven har sin metode for korrelasjon mellom slagseighet og bruddseighet.

Behandling av bruddseighets verdier som skal brukes innen bruddmekanisk analyse avhenger av ulike typer data som K , J eller CTOD som er tilgjengelig. Dette kompliserer bruddmekanisk analyse og gjør det veldig vanskelig å tilegne seg en enkelt prosedyre, slik som tidligere omtalt.

I situasjoner der bruddseighetsdata ikke eksisterer og ikke kan skaffes til veie, på noen som helst måte er utfordringen å velge riktig korrelasjonsmetode. I figur 35 er det laget et flytdiagram som viser hvordan man skal velge riktig korrelasjonsmetode ut fra de slagseighetsverdiene man har tilgjengelig. Dette er da primært for de estimeringsteknikkene beskrevet i den Britiske Standarden BS 7910.

Prosedyren beskrevet videre i denne rapporten representerer en brukervennlig steg for steg metode som tillater vurdering av bruddseigheten ut fra slagseighetsverdier basert på de teknikkene beskrevet i BS 7910. Det er for så vidt enkle korrelasjons formler som gjør at man kan regne seg frem til et estimat av de bruddseighetsverdiene man trenger. Det er viktig å ta til rette for at dette kun er estimerer.

Direkte bruddseighetsdata er ikke alltid like lett tilgjengelig og det er heller ikke så lett å generere. Dette nødvendiggjør mulighetene for å estimere bruddseighetsdata ut fra formler som bruker Charpy slagseighet. Siden det ikke eksisterer én enkelt korrelasjon som kan brukes over hele omslagskurven, er det tilrettelagt tre fremgangsmåter.

De tre metodene for å regne seg frem til bruddseighet er:

1. Nedre grense korrelasjon for det sprø området.
2. En statistisk metode for omslagsområdet.
3. En øvre grense korrelasjon for det seige området.

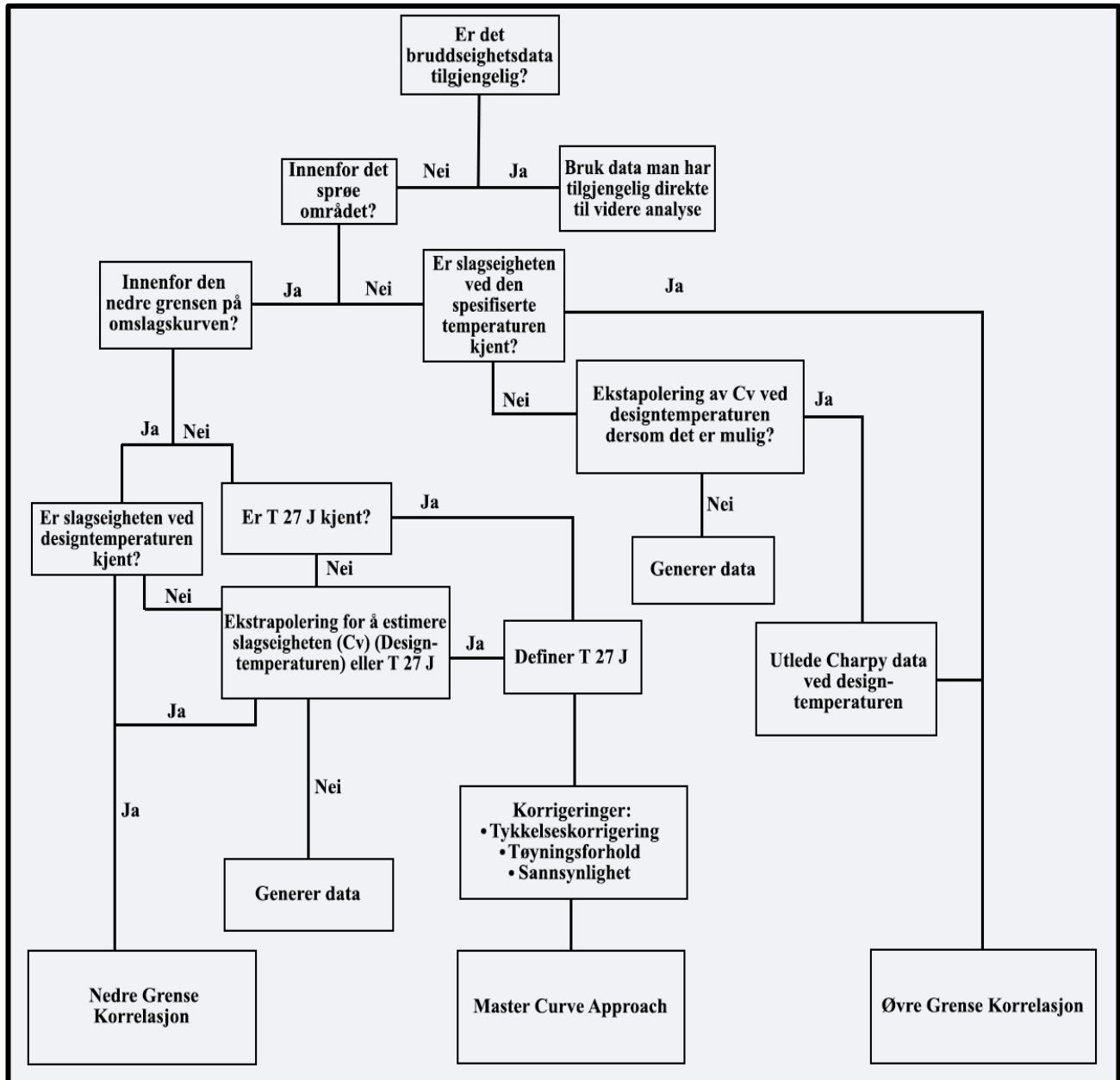
Innenfor SINTAP rapporten er det også gitt veiledning innen følgende:

- Bestemmelse av Charpy 27/28J temperatur ($T_{27/28J}$) ved andre temperaturer.
- Konvertering av K , J og CTOD verdier til en anvendelig K_{mat} verdi.
- Påvirkning av tøyning.
- Håndtering av Charpy data som er SUB-SIZE (små) prøver.

Disse punktene anser jeg som viktige og veldig relevante når det gjelder valg av korrelasjonsformel. Derfor har jeg følgelig valgt å beskrive disse punktene ytterligere senere i rapporten.

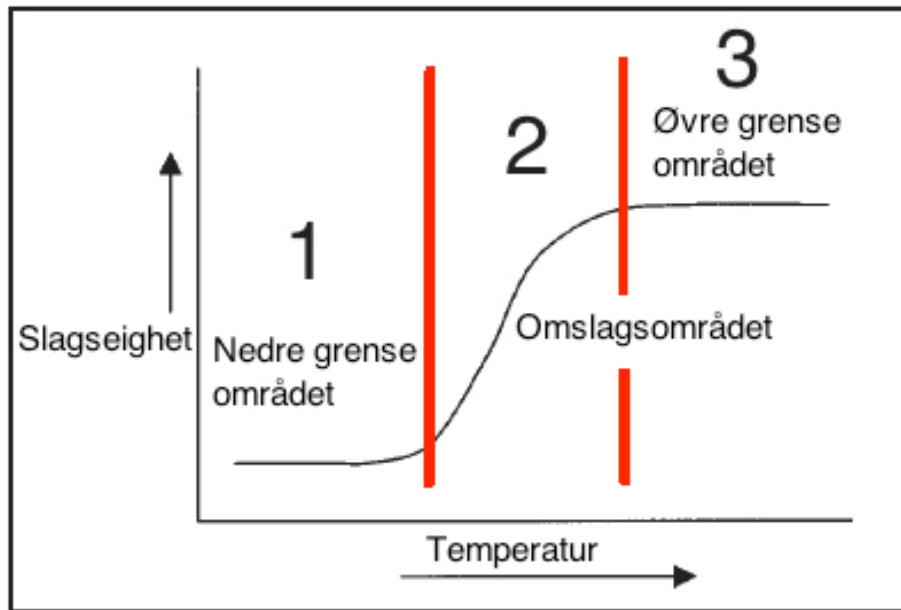
4.1. Valg av korrelasjon

For å finne hvilken korrelasjonsmetode man skal bruke er det laget et flytdiagram som man kan følge. Dette flytdiagrammet kan man finne i SINTAP rapporten [S.2]. Denne veileder en til å velge riktig metode, ut fra de dataene man har tilgjengelig. Flytdiagrammet baserer seg på korrelasjonsformlene fra den Britiske Standarden BS 7910.



Figur 35: Flytdiagram som viser riktig valg av korrelasjonsmetode for estimering av bruddseighet ut fra slagseighet [S.2].

Flytdiagrammet i figur 35 viser en oversiktlig måte å komme frem til riktig korrelasjons metode. Følger man denne vil man komme frem til en av de tre ulike metodene: nedre grense korrelasjon, omslagsområde men også kalt for ”The Master Curve Approach” eller øvre grense korrelasjon. Disse estimeringsteknikkene er beskrevet ytterligere i neste kapittel.



Figur 36: Omslagskurve for stål. Her ser man veldig tydelig de tre fasene der stålet går over fra å være sprøtt til seigt ved økt temperatur. Kurven er blitt delt inn i tre hovedgrupperinger [10].

Figur 36 viser omslagskurven for stål, jeg har delt inn kurven i tre områder.

1. Nedre grense området, det sprø området.
2. Omslagsområdet.
3. Øvre grense området, det seige området.

For punkt 1. Nedre grense korrelasjon: Finnes det bare ett uttrykk.

For punkt 2. Omslagsområdet: Et uttrykk er gitt som er aktuelt for den nedre grensen og for omslagskurven med mulighet for tykkelseskorrigerings og tøyingskorrigering.

For punkt 3. Øvre grense korrelasjon: Her er det to uttrykk som er gitt som gir brukeren muligheten til å velge den mest hensiktsmessige. Den første korrelasjonen benytter kun slagseigheten til å estimere bruddseigheten. Den andre korrelasjonen tar hensyn til flytegrensen.

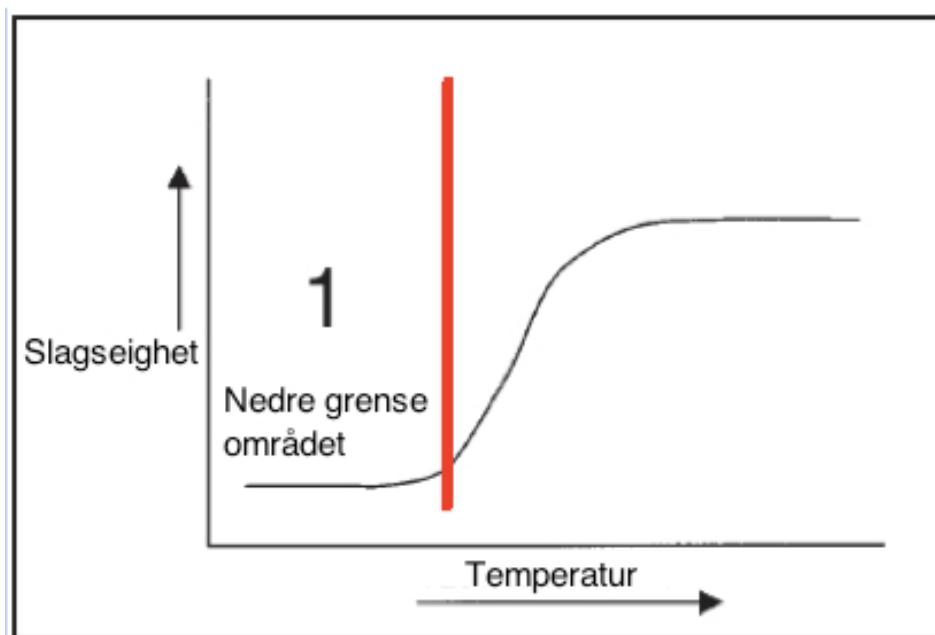
[S.2]

5. Estimeringsteknikker

Estimeringsteknikkene gjennomgått her er de som er stadfestet i den Britiske Standarden BS 7910 og den Britiske SINTAP rapporten jeg har som hovedgrunnlag for oppgaven.

5.1. Nedre grense korrelasjon

Nedre grense område er vist i figur 37, området markert til venstre for den røde linjen. I dette området vil materialet oppføre seg sprøtt og brudd vil oppstå lettere enn ved andre steder på kurven. Det vil si at det skal mindre slagseighet til, og fare for brudd er større enn ved høyere temperaturer. Dersom man vet at materialet oppfører seg slik, og tilfredsstillende dette området på omslagskurven er korrelasjonsmetoden beskrevet under den rette formelen å bruke for få et estimat av bruddseigheten.



Figur 37: Omslagskurven for stål der det nedre grense området er definert til venstre for den røde linjen [10].

Formelen for det nedre grense område er som følger:

$$K_{mat_{25}} = 12\sqrt{C_v} \quad (8)$$

Her er $K_{mat_{25}}$ den estimerte K-baserte bruddseigheten til materialet i $\text{MPa}\sqrt{m}$ for en prøve med tykkelse på 25mm, og en slagseighetsverdi C_v målt i joules.

Bruddseighetsformelen i formel (8) over gjelder kun for 25mm tykke prøver. Det vil si at det er nødvendig med tykkelseskorrigeringsformelen. Formelen for K_{mat} er som følger:

$$K_{mat} = [(K_{mat,25} - 20) \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4}] + 20 \quad (9)$$

Som også kan skrives:

$$K_{mat} = \left[(12\sqrt{C_v} - 20) \left(\frac{25}{B} \right)^{\frac{1}{4}} \right] + 20 \quad (10)$$

der parameterne i formelen er som følger:

Tabell 7: Tabellen viser parameterne brukt i formlene (8) og (9).

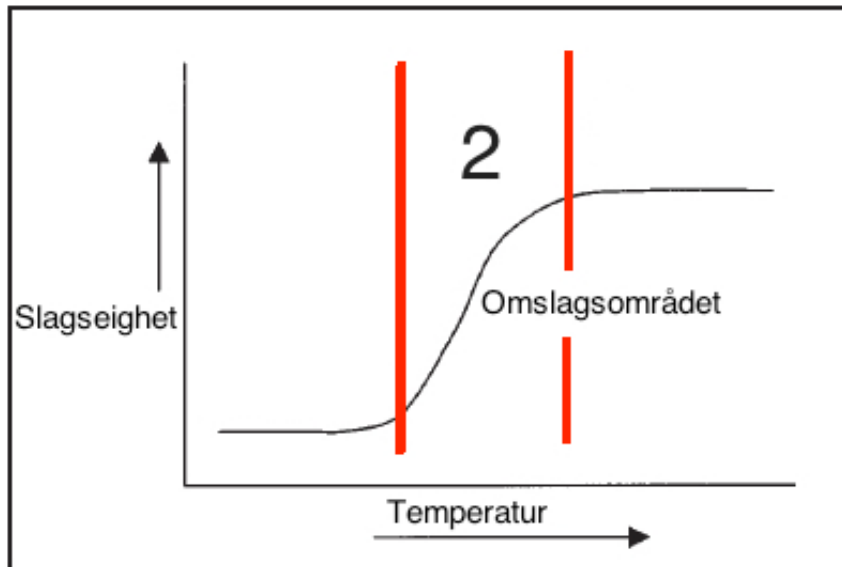
Symbol	Beskrivelse	Enhet
K_{mat}	Estimat av bruddseigheten	$\text{MPa}\sqrt{m}$
B	Tykkelsen på materialet	mm
C_v	Charpy slagseighet	Joules (J)

Det vil si at ut fra formel (8), (9) og (10) listet over kan man komme frem til et estimat av bruddseigheten for et materiale dersom man har de nødvendige slagseighetsverdiene tilgjengelig. Forutsetningen er at man er sikker på at disse verdiene er innenfor det nedre grenseområdet. Dette er en meget enkel metode for å estimere bruddseigheten ut fra Charpy slagseighet for det nedre grenseområdet.

[S.2]

5.2. Statistisk metode for omslagsområde

Statistisk metode for omslagsområdet, også omtalt som "The Master Curve Approach" ifølge den Britiske Standarden BS 7910. Denne metoden gjelder dersom slagseigheten man har tilgjengelig er innenfor selve omslagsområdet på omslagskurven. Omslagsområdet er vist i figur 38, markert tydelig mellom de to røde linjene. Omslagstemperaturen er den temperaturen der man får en relativ skarp overgang fra seig til sprø tilstand ved avkjøling av stål. Omslagstemperaturen defineres som den temperaturen hvor det medgår en viss energi, 27/28 Joules for å slå av en standard Charpy V prøvestav.



Figur 38: Omslagskurven for stål der omslagsområdet er området mellom de røde linjene [10].

Denne metoden er basert på korrelasjonen mellom spesifikke omslagstemperaturer mellom Charpy temperatur ($T_{27/28J}$) og en spesifikk bruddseighets temperatur ($T_{100MPa\sqrt{m}}$). Forholdet er så modifisert med hensyn på følgende faktorer:

- Tykkelseskorrigerings.
- Skalering (Spredning over en skala).
- Fasong på omslagskurve.
- Kumulativ bruddsannsynlighet.

Metoden krever en definert Charpy omslagstemperatur ved 27/28 Joules. Der hvor dette ikke er kjent bruker man ekstrapolering fra enten lavere eller høyere verdier. Dette forklares ytterligere og mer detaljert senere i rapporten.

For materialer som er definert innenfor det ”sprø” området kan også estimatet av bruddseighet utføres ved bruk av denne metoden, ”The Master Curve Approach”. Denne metoden er basert på en korrelasjon mellom Charpy 27/28 Joules temperatur og temperaturen for $K_{mat} = 100MPa\sqrt{m}$. Forholdet er modifisert med hensyn på kumulativ bruddsannsynlighet, tykkelseskorrigerings og fasongen på bruddseighetens omslagskurve.

Dermed kan bruddseigheten K_{mat} i omslagsområdet defineres som:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{0,019(T-T_{28J}+18^{\circ}C)}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4} \quad (11)$$

Tabell 8: Tabellen gir en oversikt over hvilke parametere som er blitt brukt i formel (11) over.

Symbol	Beskrivelse	Enhet
K_{mat}	Estimatet av bruddseigheten	$MPa\sqrt{m}$
T	Design temperaturen – Temperaturen der man har tenkt å finne bruddseigheten	$(^{\circ}C)$
C_v	Charpy slagseighet	Joules (J)
$T_{27/28J}$	27 / 28 J Charpy omslagstemperatur	$^{\circ}C$
B	Tykkelse / eller 2c	mm
P_f	Sannsynligheten for at K_{mat} er mindre enn estimert. Bruken av $P_f = 0,05$ (5%) er anbefalt i standarden BS 7910.	%
Standardavvik	13	$^{\circ}C$

Ved en slagseighet på 27/28 Joules, blir bruken av formel (8) med en lavere femte prosentil av bruddseigheten og et 90% konfidensintervall - fører dette tilbake til den første ligningen beskrevet ytterligere i nedre grense korrelasjonen:

$$K_{mat_{25}} = 12\sqrt{C_v}$$

Der $K_{mat_{25}}$ er den estimerte K-baserte bruddseigheten for et materiale i $MPa\sqrt{m}$ for en tykkelse på 25mm.

Bruddseigheten evaluert i formel (8), $K_{mat_{25}}$ gjelder for prøvestaver med en tykkelse på 25mm. Den resulterende K_{mat} verdien må derfor også her korrigeres for den korrekte tykkelsen. Dette gjøres ved å bruke formelen for tykkelses korrigering:

$$K_{mat} = [(K_{mat,25} - 20) \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4}] + 20$$

Kort oppsummert betyr det at man kan benytte seg av ”The Master Curve Approach” både for nedre grense området og for omslagsområdet på omslagskurven for stål.

[S.2]

5.2.1 Utledning av "The Master Curve Approach"

For ulike tykkelser B_1 og B_2 er bruddseigheten relatert slik:

$$K_{B2} = (K_{B1} - K_{min}) \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{\frac{1}{4}} + K_{min} \quad (12)$$

Der K_{min} er bruddseigheten for den nedre grensen, som for konstruksjonsstål er satt til en fast verdi, en konstant på $20\text{MPa}\sqrt{m}$ [S.16]. For overflate sprekker, er B tilsvarende sprekk lengden $2c$ [S.18].

Spekteret av sprøe bruddseigheter kan beskrives slik:

$$P_f = 1 - e^{-\left(\frac{K_f - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right)^4} \quad (13)$$

Hvor P_f er sannsynligheten for at K_{mat} er mindre enn først estimert. Bruken av $P_f = 0,05$ (5%) er anbefalt ifølge den Britiske Standarden BS 7910 [S.6].

K_f er bruddseigheten som er korresponderende til P_f . K_0 er bruddseigheten korresponderende til 63,2% brudds sannsynlighet, og K_{min} er den nedre grense bruddseigheten, satt til $20\text{MPa}\sqrt{m}$ [S.16].

Temperaturavhengigheten til K_0 i $\text{MPa}\sqrt{m}$ kan beskrives slik:

$$K_0 = \alpha + \beta \cdot e^{[\gamma \cdot (T - T_0)]} \quad (14)$$

Hvor $\alpha + \beta = 108\text{MPa}\sqrt{m}$, T_0 er temperaturen i grader ($^{\circ}\text{C}$) hvor gjennomsnittlig bruddseighet er $100\text{MPa}\sqrt{m}$ og anses da som en material konstant. Dermed settes $\alpha = 31$, $\beta = 77$ og $\gamma = 0,019$. Eksperimenter har vist at α , β og γ er tilnærmet material uavhengige [S.2].

Den resulterende ligningen for temperatur avhengigheten til K_0 , som korresponderer til prøver med 25mm tykkelse kan dermed skrives slik:

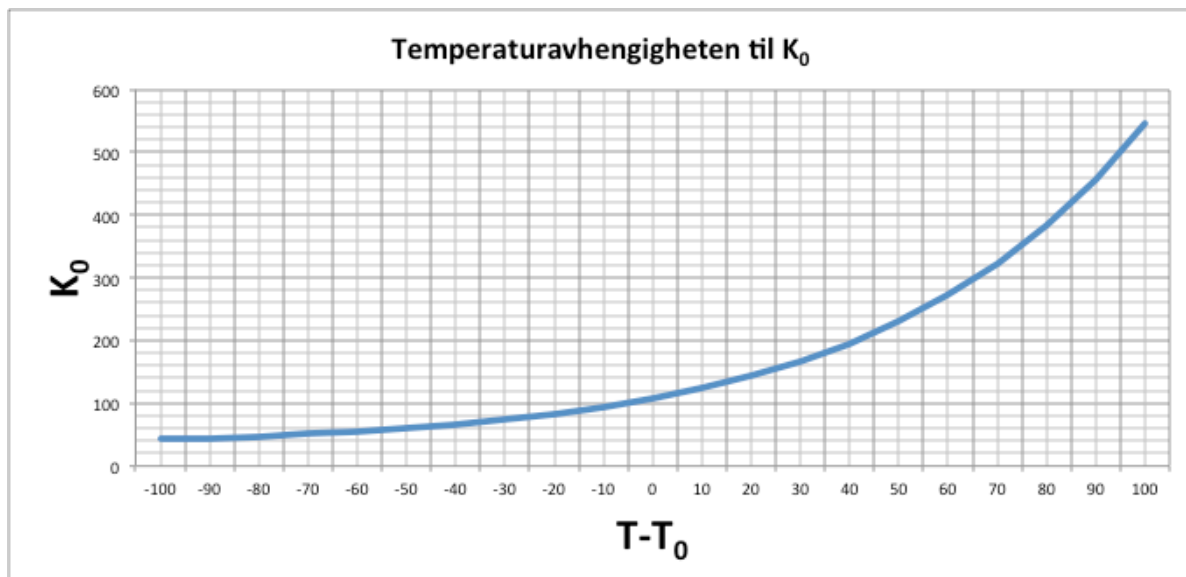
$$K_0 = 31 + 77e^{[0,019(T - T_0)]} \quad (15)$$

For å demonstrere hvordan formelen fungerer, ved å sette $T - T_0 = -100^{\circ}\text{C}$ fungerer formelen på følgende måte:

$$K_0 = 31 + 77e^{[0,019(-100)]}$$

$$K_0 = 42,52\text{MPa}\sqrt{m}$$

Formel (15) som er temperaturavhengigheten til K_0 er vist i figur 39:



Figur 39: Temperaturavhengigheten til K_0 for $B = 25\text{mm}$ ved bruk av formelen $K_0 = 31 + 77e^{[0,019(T-T_0)]}$ med verdier fra -100°C til 100°C [S.2].

De tilhørende verdiene fra -100°C til 100°C for $T-T_0$ er blitt kalkulert med bruk av regneark i Excel, og de utregnede verdiene er vist i tabell 9.

Tabell 9: Verdier for $T-T_0$ fra -100°C til 100°C ved bruk av formelen $K_0 = 31 + 77e^{[0,019(T-T_0)]}$ Disse verdiene er plottet i figur 39.

$T-T_0$ ($^\circ\text{C}$)	K_{mat} ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
-100	42,52
-90	44,93
-80	47,84
-70	51,37
-60	55,63
-50	60,78
-40	67,00
-30	74,55
-20	83,66
-10	94,68
0	108,00
10	124,11
20	143,60
30	167,16
40	195,64
50	230,10
60	271,80
70	322,14
80	383,06
90	456,73
100	545,81

Det gjennomsnittlige forholdet mellom 27/28Joules Charpy og $100 \text{ MPa}\sqrt{m}$ bruddseighets temperatur i omslagsområdet, $TK_{27/28J}$ og $TK_{100\text{MPa}\sqrt{m}}$ er gitt ved:

$$TK_{100\text{MPa}\sqrt{m}} = T_{K27/28J} - 18^\circ\text{C} (\pm 15^\circ\text{C}) \quad (16)$$

Forholdet mellom 27/28J Charpy omslagstemperatur ($T_{27/28J}$) og $100\text{MPa}\sqrt{m}$ bruddseighetens omslagstemperatur (T_0) ved 25mm prøve er beskrevet slik:

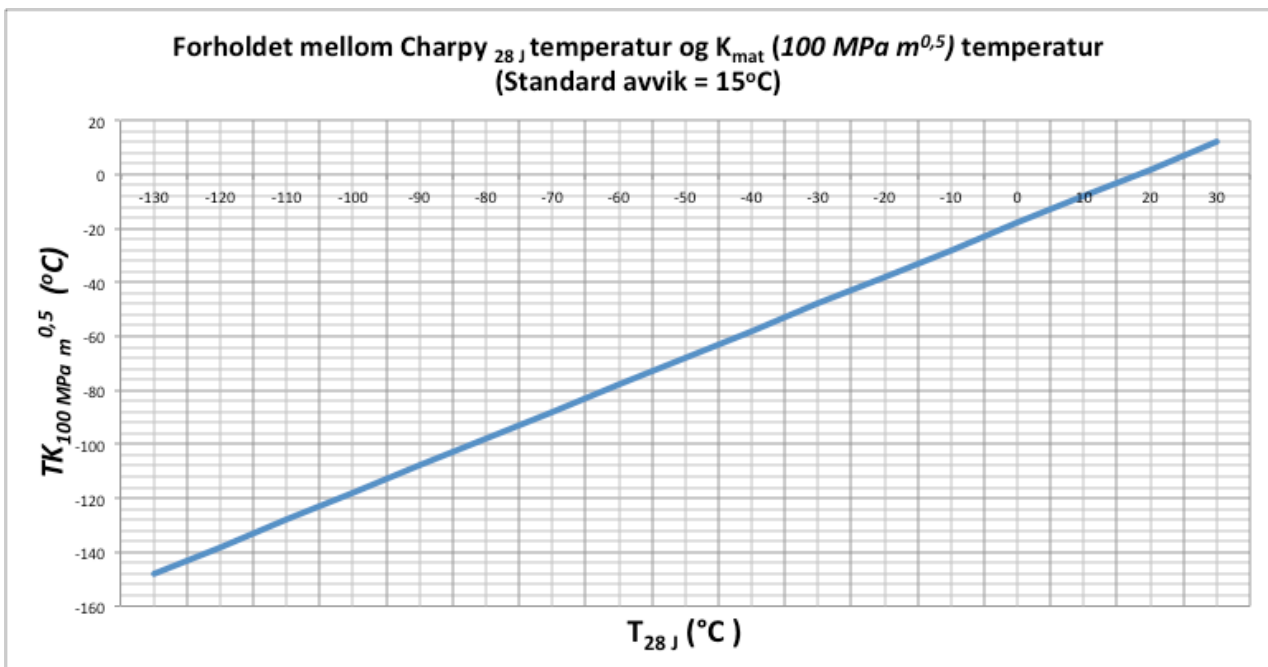
$$TK_{100\text{MPa}\sqrt{m}} = T_{K27/28J} - 18^\circ\text{C} \text{ (Standardavvik} = 15^\circ\text{C)} \quad (17)$$

Der:

- T_0 er temperaturen for median seighet for $100\text{MPa}\sqrt{m}$ ved 25mm tykke prøvestaver.
- $T_{27/28J}$ er temperatur for Charpy energier ved 27/28J, målt på en standard Charpy V prøvestav.

[S.2]

Utrykket vises grafisk i figur 40.



Figur 40: Grafen viser forholdet mellom Charpy $T_{27/28J}$ temperatur og $K_{mat} 100 \text{ MPa}\sqrt{m}$ temperatur [S.2].

Ved å bruke $T_{K27/28J}$ fra -130°C til 30°C er det blitt plottet $TK_{100\text{MPa}\sqrt{m}}$ for alle verdiene, disse verdiene kan ses i tabell 10 og sett i figur 40.

Tabell 10: Viser verdiene fra de ulike temperatuene $T_{27/28J}$ og $TK_{100MPa\sqrt{m}}$ ved bruk av formelen $TK_{100MPa\sqrt{m}} = T_{28J} - 18^\circ C$. Resultatet er plottet i figur 40.

Temperatur T_{28J} ($^\circ C$)	$TK_{100MPa\sqrt{m}}$
-130	-148
-120	-138
-110	-128
-100	-118
-90	-108
-80	-98
-70	-88
-60	-78
-50	-68
-40	-58
-30	-48
-20	-38
-10	-28
0	-18
10	-8
20	2
30	12

Ved å kombinere formlene for tykkelses korrigerings (12), kumulativ bruddsannsynlighet (13), fasong på omslagskurven (15) og forhold mellom Charpy og bruddseighets temperaturer (16) kan bruddseighetskurven beskrives for sprø brudd i omslagsområde basert på viten om Charpy slagseighet ved 27/28J temperatur [S.2]:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(T-T_{28J}+18^\circ C)\}}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4} \quad (18)$$

Bruken av formelverket fungerer på følgende måte, man velger en bruddsannsynlighet P_f som er passende, og setter de tilsvarende verdiene inn i formel (18).

Ved en tykkelse $B = 25\text{mm}$ og en bruddsannsynlighet $P_f = 1\%$ og $T-T_{27/28J}$ på $0^\circ C$ fungerer formelverket slik:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(T-T_{28J}+18^\circ C)\}}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(0+18)\}}] \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,01}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(0+18)\}}] \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,01}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + [77e^{\{0,019(0+18)\}}] \left\{ \ln \left(\frac{1}{1 - 0,01} \right) \right\}^{1/4}$$

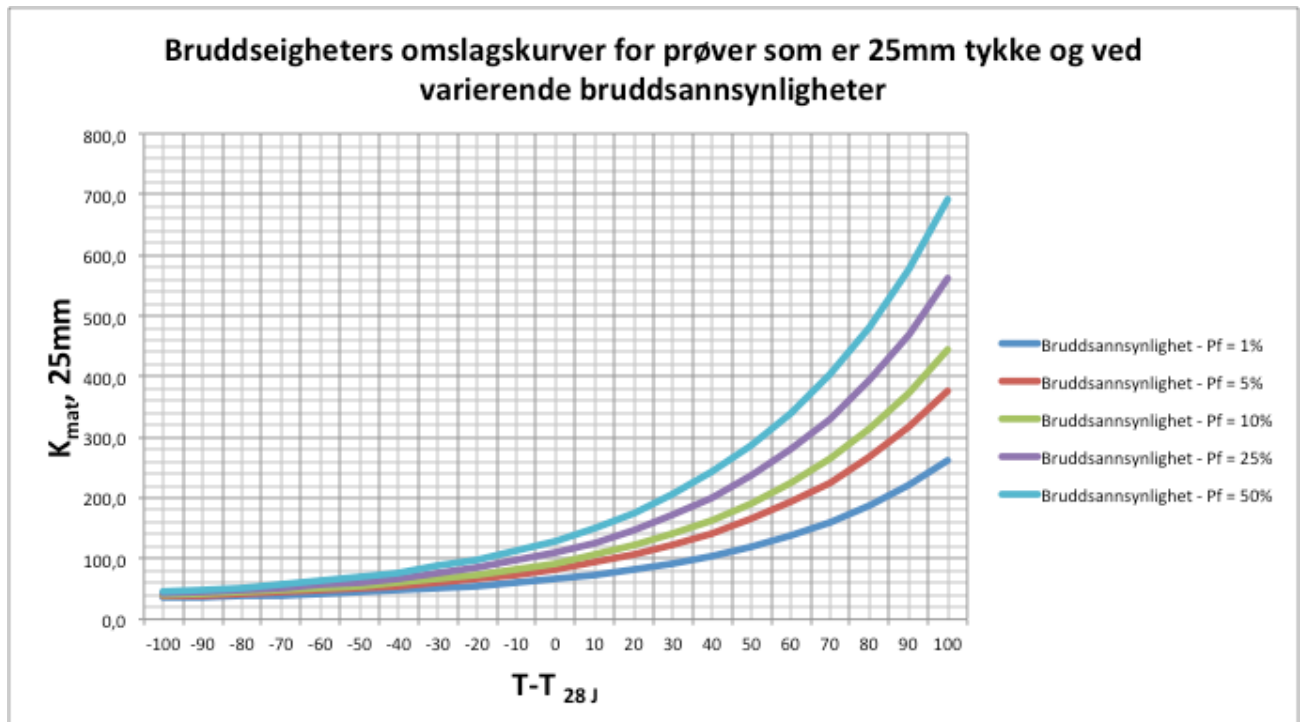
$$K_{mat} = 65,32 \text{MPa}\sqrt{m}$$

I tabell 11 har jeg brukt regneark i Excel for å kalkulere ulike verdier for bruddseigheten ved bruk av formel (18). Ved å variere verdien for $T-T_{27/28J}$ fra -100°C til 100°C og bruddsannsynligheten fra 1 – 50% kan man se de ulike K_{mat} verdiene. De utregnede verdiene er vist i tabell 11 og plottet i figur 41.

Tabell 11: Varierende bruddsannsynligheter fra 1 til 50% og varierende $T-T_{28J}$ fra -100°C til 100°C .

$T-T_{28J}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$P_f = 1\%$ ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	$P_f = 5\%$ ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	$P_f = 10\%$ ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	$P_f = 25\%$ ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	$P_f = 50\%$ ($\text{MPa}\sqrt{m}$)
-100	36,1	38,7	40,2	42,9	45,8
-90	37,2	40,3	42,2	45,4	48,9
-80	38,5	42,3	44,5	48,4	52,6
-70	40,1	44,6	47,3	52	57,2
-60	42	47,5	50,8	56,4	62,6
-50	44,3	51	54,9	61,7	69,3
-40	47,1	55,1	59,9	68,1	77,3
-30	50,4	60,2	65,9	75,9	86,9
-20	54,5	66,3	73,2	85,3	98,6
-10	59,4	73,7	82,1	96,6	112,8
0	65,3	82,6	92,8	110,4	129,9
10	72,5	93,4	105,7	127	150,6
20	81,2	106,4	121,3	147,1	175,6
30	91,7	122,2	140,2	171,4	205,9
40	104,4	141,3	163,1	200,8	242,5
50	119,7	164,4	190,7	236,3	286,7
60	138,3	192,3	224,1	279,2	340,3
70	160,8	226,1	264,5	331,2	405
80	187,9	266,9	313,4	394	483,2
90	220,8	316,2	372,5	469,9	577,9
100	260,5	375,9	443,9	561,8	692,3

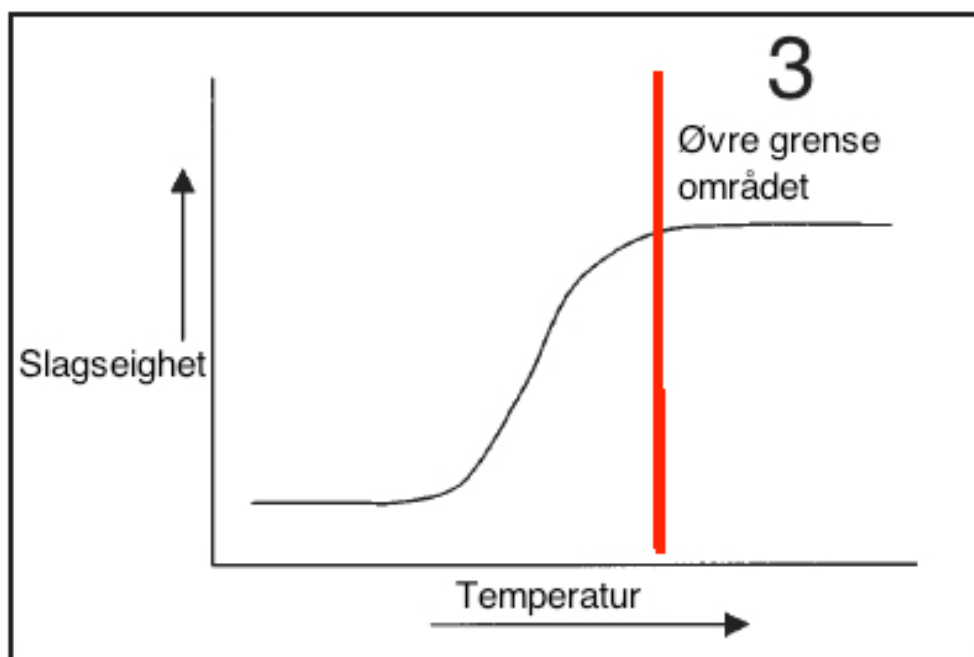
Et sett med omslagskurver med 25mm prøver og forskjellige bruddsannsynligheter er vist i figur 41 med bruk av verdiene kalkulert i tabell 11.



Figur 41: Bruddseigheter ved forskjellig bruddsannsynlighet P_f [S.2].

5.3. Øvre grense korrelasjon

Denne korrelasjonsmetoden gjelder for slagseigheter som er innenfor det øvre grense område på omslagskurven. Vi er nå i det øvre grensesjiktet som tilsier at materialet oppfører seg seigt. Her er ingen av de tidligere korrelasjonene aktuelle å bruke, og vi må derfor ha en egen korrelasjon for slagseigheter i dette området. Det vil si at når vi er innenfor dette området, til høyre for den røde linjen i figur 42 er vi oppe på forholdsvis høye temperaturer.



Figur 42: Øvre grense området for seige brudd er til høyre for den røde linjen [10].

Når Charpy slagseigheter er innenfor den øvre del av omslagskurven, det øvre grense område bruker vi formlene under, formel (19) og formel (20). Definisjon på når man er innenfor det øvre grense område er når Charpy slagseigheten er skjær/seig [S.2].

Dette gjør sitt til at de korrelasjonene vi har gått igjennom tidligere, ikke kan benyttes i dette tilfellet.

En korrelasjon for det øvre grense område uttrykkes slik:

$$K_{mat} = 0,54C_v + 55 \quad (19)$$

Formelen fungerer slik, ved en slagseighetsverdi på 40 Joules:

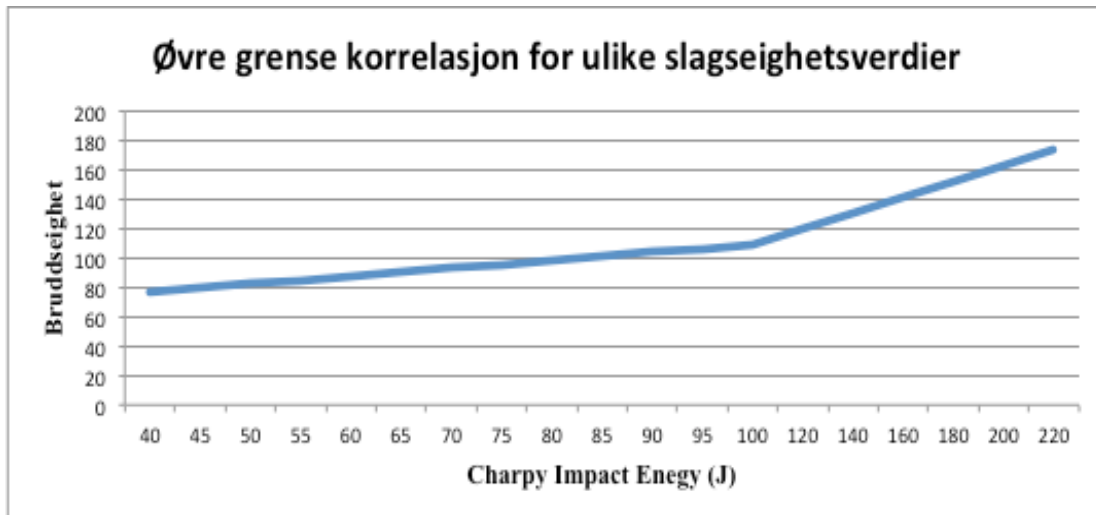
$$K_{mat} = 0,54(40) + 55$$

$$K_{mat} = 76,6MPa\sqrt{m}$$

I tabell 12 er de kalkulerte bruddseighetene for Charpy slagseighetsverdier fra 40 til 220 Joules. Regneark i Excel ble benyttet for å regne ut de tilhørende verdiene.

Tabell 12: Viser ulike Charpy slagseighetsverdier, og hvilke bruddseighets verdier man får ved å bruke korrelasjonsformelen over, formel (19).

Charpy slagseighet (J)	Bruddseighet (MPa \sqrt{m})
40	76,6
45	79,3
50	82
55	84,7
60	87,4
65	90,1
70	92,8
75	95,5
70	98,2
85	100,9
90	103,6
95	106,3
100	109
120	119,8
140	130,6
160	141,4
180	152,2
200	163
220	173,8



Figur 43: Kurven viser bruddseighet versus slagseighet for verdiene kalkulert i tabell 12 ved bruk av formelen $K_{mat} = 0,54C_v + 55$ [S.2].

Bruddseighetsverdier kalkulert i henhold til korrelasjonen over, formel (19) kan sammenlignes med verdier avledet fra uttrykket under, formel (20). Dette uttrykket tar hensyn til flytegrensen i materialet. Formelen ser slik ut:

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right) \quad (20)$$

Denne formelen fungerer på følgende måte, ved først å løse for K_{mat} :

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

$$\frac{K_{mat}}{\sigma_y} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)}$$

$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)} \cdot \sigma_y$$

Ved en slagseighetsverdi på 40 Joules og en flytegrense på 350MPa fungerer formelverket på denne måten:

$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{40}{350} - 0,02\right)} \cdot 350$$

$$K_{mat} = 77,5 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

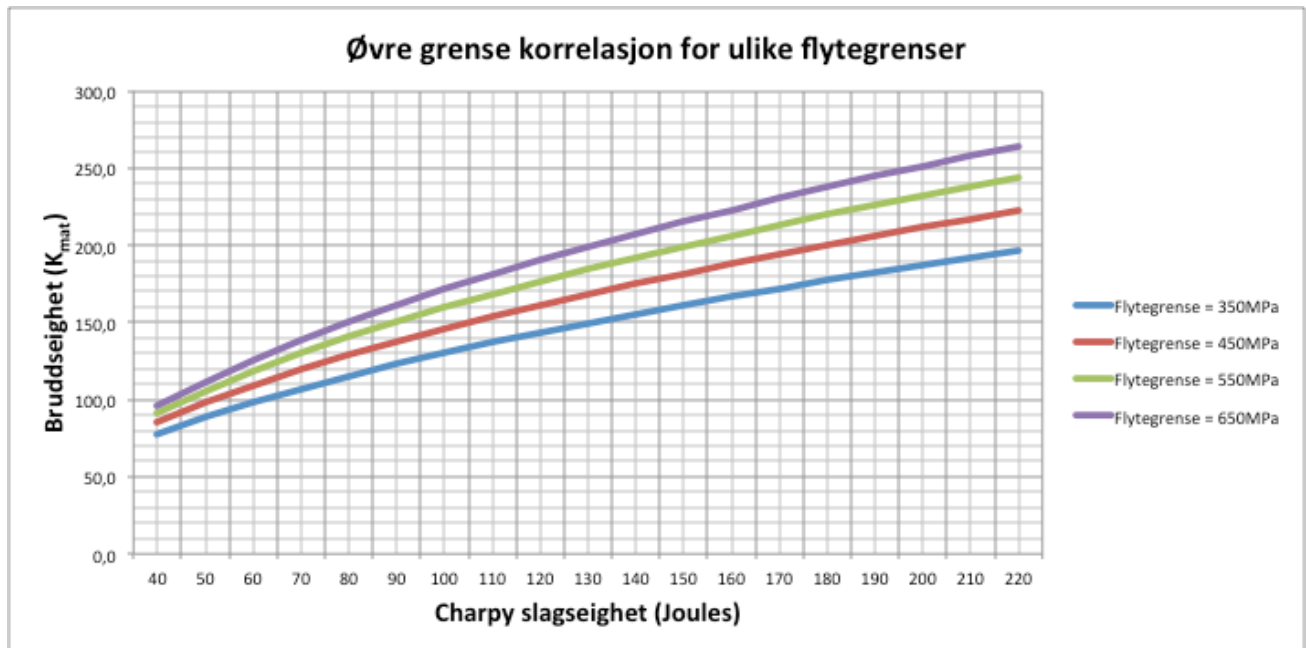
Her kommer man frem til en estimert bruddseighet, en K_{mat} verdi på $77,5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ for en slagseighetsverdi på 40 Joules og en flytegrense på 350MPa.

Følgelig har jeg brukt regneark i Excel for å prøve ut ulike verdier for slagseighet med formel (20). Prøver slagseighetsverdier fra 40 - 220 Joules og flytegrenser fra 350 - 650MPa. Resultatet av dette kan ses i tabell 13 og er følgelig plottet i figur 44.

Tabell 13: Bruddseigheter ved ulike flytegrenser.

Slagseighet (Joules)	K_{mat} (MPa \sqrt{m}) – $R_e = 350\text{MPa}$	K_{mat} (MPa \sqrt{m}) – $R_e = 450\text{MPa}$	K_{mat} (MPa \sqrt{m}) – $R_e = 550\text{MPa}$	K_{mat} (MPa \sqrt{m}) – $R_e = 650\text{MPa}$
40	77,5	85,2	91,1	95,5
50	88,5	97,9	105,6	111,8
60	98,2	109,2	118,4	126
70	107,1	119,5	129,9	138,8
80	115,3	128,9	140,5	150,5
90	122,9	137,7	150,3	161,3
100	130,1	145,9	159,5	171,5
110	136,9	153,7	168,3	181,1
120	143,4	161,2	176,6	190,2
130	149,6	168,3	184,5	198,9
140	155,6	175,1	192,1	207,2
150	161,3	181,6	199,4	215,2
160	166,9	188	206,4	222,9
170	172,2	194,1	213,2	230,4
180	177,4	200,0	219,8	237,6
190	182,5	205,8	226,3	244,6
200	187,4	211,4	232,5	251,4
210	192,2	216,9	238,6	258,0
220	196,9	222,2	244,5	264,5

Verdiene fra tabell 13 er plottet i figur 44.



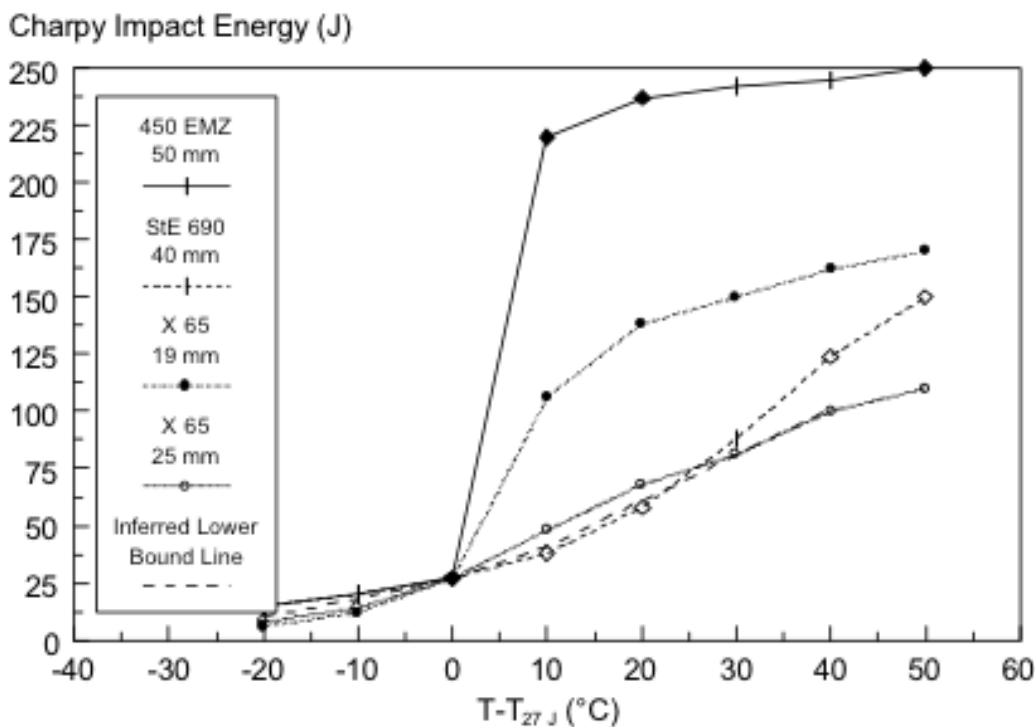
Figur 44: Øvre grense korrelasjon ved bruk av formel (20) for ulike flytegrenser. Høyere flytegrense gir høyere estimat av bruddseighet [S.2].

6. Temperatur ved Charpy 27/28 Joules

$T_{27/28 J}$ fra Charpy verdier ved andre temperaturer:

I forbindelse med "The Master Curve Approach" kreves det at man har kjennskap til den temperaturen som er ved 27/28 Joules, også kalt omslagstemperaturen. Ofte når stål har blitt slagseighetstestet, har det bare blitt testet på en bestemt temperatur. Denne temperaturen korresponderer ikke alltid med $T_{27/28 J}$ som man ofte trenger. I slike tilfeller bruker man ekstrapolering for å bestemme temperaturen $T_{27/28 J}$ som gir en slagseighetsverdi på 27/28 Joules. [S.2]

Når temperaturen som gir 27/28 Joules ikke er kjent, kan den bli estimert ved bruk av ekstrapolering ut fra Charpy slagseighets verdier ved andre temperaturer. Ekstrapolering er å avgjøre verdien til en funksjon utenfor et område der en rekke funksjonsverdier er kjent [18]. På grunn av de ulike fasongene på Charpy omslagskurver, se figur 45 nedenfor, kan bare ekstrapolering brukes på et begrenset utvalg. De anbefalte verdiene for ekstrapolering er gitt i tabell 14 og vist i figur 46.



Figur 45: Eksempler på Charpy omslagskurver som er referert til 27/28 Joules temperatur [S.2].

De anbefalte temperatuene for ekstrapolering er gitt i tabell 14. Disse anbefalingene er gitt i SINTAP rapporten [S.2].

Tabell 14: Viser de anbefalte verdiene for ekstrapolering [S.2].

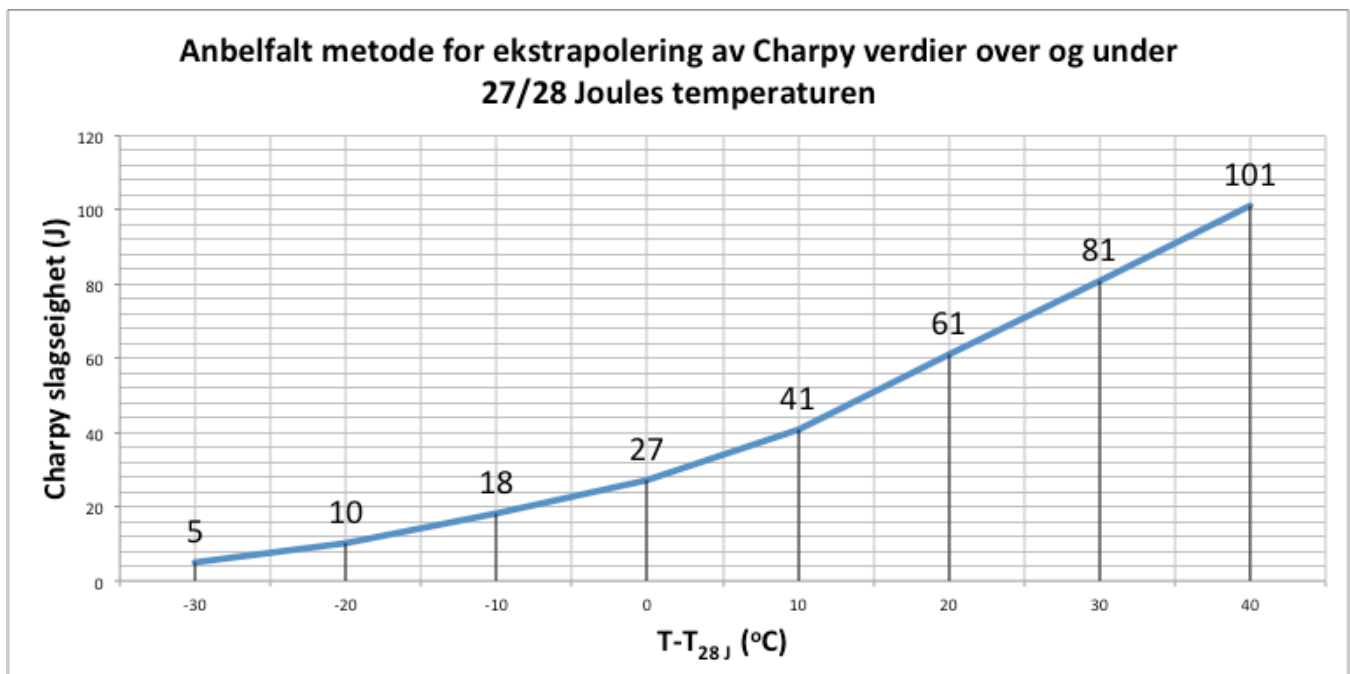
Forskjellen mellom driftstemperatur og 27/28 J Charpy omslagstemperatur (°C)	Antatt Charpy slagseighet målt i joules (J)
-30	5
-20	10
-10	18
0	27
+10	41
+20	61
+30	81
+40	101

Merk at:

1. Interpolering mellom temperaturene er tillatt [S.2].
2. Ekstrapolering for høyere temperaturer enn vist i tabell 14 bør brukes med forsiktighet.

Ved bruk av ekstrapolering for å finne frem til et estimat av omslagstemperaturen bør man være ytterst forsiktig.

[S.2]



Figur 46: Anbefalt metode for ekstrapolering av Charpy verdier over og under omslagstemperaturen ved 27/28 Joules. Grafen inneholder verdiene fra tabell 14 [S.2].

7. K-verdi tilnærming

De ulike estimeringsteknikkene baserer seg på en definert material spesifikk K_{mat} verdi. Bruddseighets verdien som skal brukes innen disse estimeringsteknikkene er derfor basert på en K-verdi tilnærming. Dette inkluderer konverteringen fra K, J og CTOD. Alle andre bruddseighets verdier er derfor konvertert til K_{mat} , som derav representerer en unik parameter og som gir et estimat av materialets bruddseighet. De ulike behandlingene som trengs for bruddseighets analyse, inkludert tykkelseskorrigerer er da anvendt direkte ved bruk av K_{mat} verdier.

7.1. Definisjon av K_{mat}

Estimatet av materialets bruddseighet er uttrykt som K_{mat} . Generelt så er bruddseighets verdier basert på K, J eller CTOD. Uavhengig av benevning er det foretrukket at bruddseigheten er uttrykt i form av en ekvivalent K-verdi, som betegnes derfor som K_{mat} [S.11]. Denne K_{mat} verdien brukes stort sett for alle korrelasjonsteknikkene beskrevet gjennom denne rapporten.

7.2. Forholdet mellom K, J og CTOD bruddseighet

Den parameteren som er representativ for bruddseigheten er basert på K_{mat} verdien. Siden K, J og CTOD verdier alle kan genereres fra en bruddseighetstest, er det i noen tilfeller nødvendig å konvertere mellom disse parameterne. For eksempel når en CTOD verdi har blitt definert i form av en bruddseighetstest og det er en K-verdi tilnærming man egentlig ønsker for videre bruddmekanisk analyse.

Selv om direkte bruddmekaniske bruddseighetsverdier er tilgjengelige, kan verdiene man har være i mange forskjellige benevninger. Et materiales bruddseighet fra en bruddseighetstest kan forekomme som sagt fra enten K, J eller CTOD.

Istedenfor å ha egne teknikker, forskjellige ligninger og ulike tilnærminger for de ulike bruddseighets benevningene; K, J eller CTOD, er det presentert her en tilnærming der man bruker en material spesifikk K_{mat} verdi sammen med en kumulativ bruddsannsynlighet P_f definert, uavhengig av typen bruddseighet man hadde til å begynne med.

[S.11]

J_{mat} er relatert til K_{mat} ved:

$$K_{mat} = \sqrt{J_{mat} \cdot E / (1 - \nu^2)} \quad (21)$$

[S.11]

CTOD (δ_{mat}) er relatert til K_{mat} ved:

$$K_{mat} = \left[\frac{\lambda \sigma_x \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5} \quad (22)$$

λ burde være 1,5 for $\sigma_x = \sigma_y$ og 1,3 for $\sigma_x = \sigma_f$ [S.2].

Derfor blir en ekvivalent K_{mat} verdi konvertert fra CTOD (δ) i henhold til disse to uttrykkene for konstruksjonsstål:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5} \quad (23)$$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,3 \sigma_f \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5} \quad (24)$$

[S.2]

Tabell 15: Viser parameterne brukt i formlene over, formel (23) og (24).

Symbol	Betydning	Enhet
σ_y	Flytegrense	MPa
σ_f	Bruddspenning	MPa
CTOD (δ)	Crack Tip Opening Displacement	m
E	Youngs modulus	MPa
ν	Poissons ratio	-

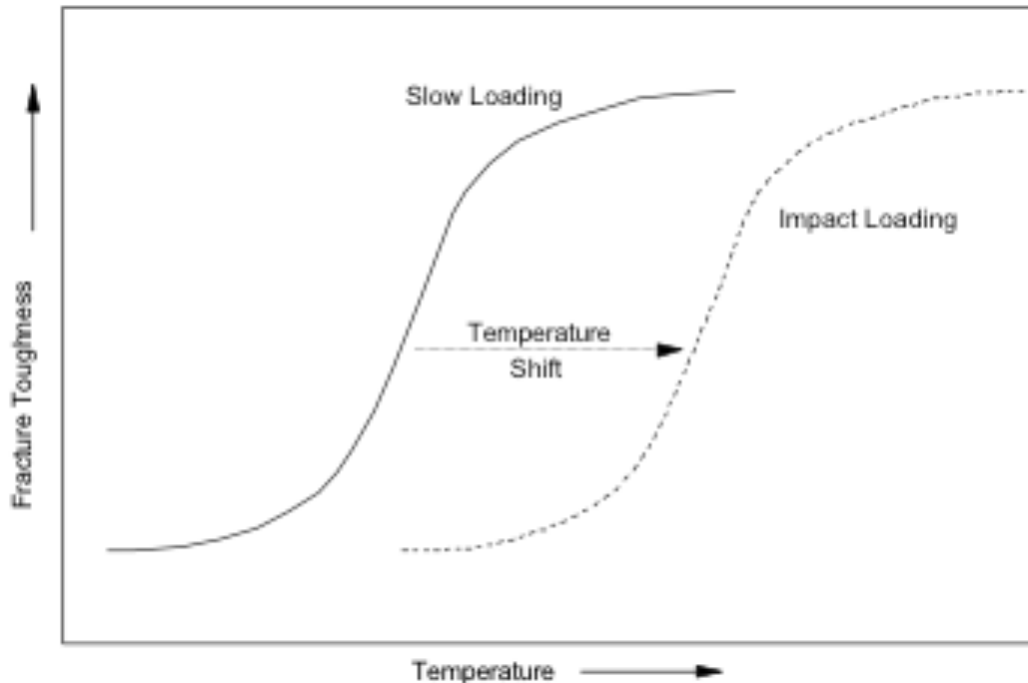
Der σ_f er definert slik [S.2]:

$$\sigma_f = \frac{(\text{Flytespenning} + \text{Strekfasthet})}{2}$$

NB: Her er det viktig å være observant. Et estimat av bruddseighet er ofte definert med $\text{MPa}\sqrt{m}$ i benevnningen mens CTOD verdier som oftest er oppgitt i millimeter. Derfor er det viktig å huske på å konvertere CTOD verdiene til meter før man benytter seg av formlene over, formel (23) og (24). Derfor er enheten i tabell 15 for CTOD satt til meter og ikke millimeter.

8. Påvirkning av tøyning

Påvirkning av tøyningens hastigheten har en tendens til å flytte bruddseighetskurven oppover langs temperaturaksen slik som vist i figur 47.



Figur 47: Skjematisk fremstilling av bruddseighetskurven som flytter seg oppover langs temperaturaksen [S.2].

Tøyningssensitiviteten for bruddseighet har som konsekvens å øke flytegrensen på stålet med økende overføringshastighet. Tøyningssensitiviteten er mer sensitiv for stål av lavere kvalitet og styrkeegenskaper enn for stål av høyere kvalitet og styrkeegenskaper.

Fremgangsmåten nedenfor beskriver hvordan man kommer frem til tøyning - korrigert bruddseighet ved bruk av Charpy slagseighet:

Metoden innebærer tre viktige trinn:

1. Bruke korrelasjon til å konvertere Charpy slagseighet til statisk styrke.
2. Få et estimat av temperatur forflytningen som en funksjon av spenningsnivået.
3. Skift i den statiske slagseighetskurven med en verdi for å få en dynamisk seighet.

Et forenklet uttrykk av temperatur forflytning på bruddseighetens omslagsområdet er gitt ved:

$$\Delta T_{\varepsilon} = \frac{1440 - p_y}{550} \left(\ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \right)^{1,5} \quad (25)$$

Der: ΔT_ε er temperatur forflytningen som følge av tøyningen ε og $\varepsilon_0 = 0,0001s^{-1}$ [S.2].

Fasongen på omslagsområdet er upåvirket av overføringshastigheten. Enhver korleksjon må derfor brukes til omslagstemperaturen for $K_{\text{mat}} = 100\text{MPa}\sqrt{m}$, hvor $B = 25\text{mm}$. Denne referanse temperaturen betegnes med T_0 .

Zener-Holloman tøyning er avhengighet av flytegrensen σ_y som er gitt ved:

$$\sigma_y = f\left(T \cdot \log\left[\frac{A}{\varepsilon}\right]\right) \quad (26)$$

Der T er temperaturen i kelvin og A er tøynings parameteren. Ved å skrive om formel (26) i form av K gir:

$$\Delta T_0 \cdot \ln\left(\frac{A^R}{K_f}\right) = \text{Konstant} \quad (27)$$

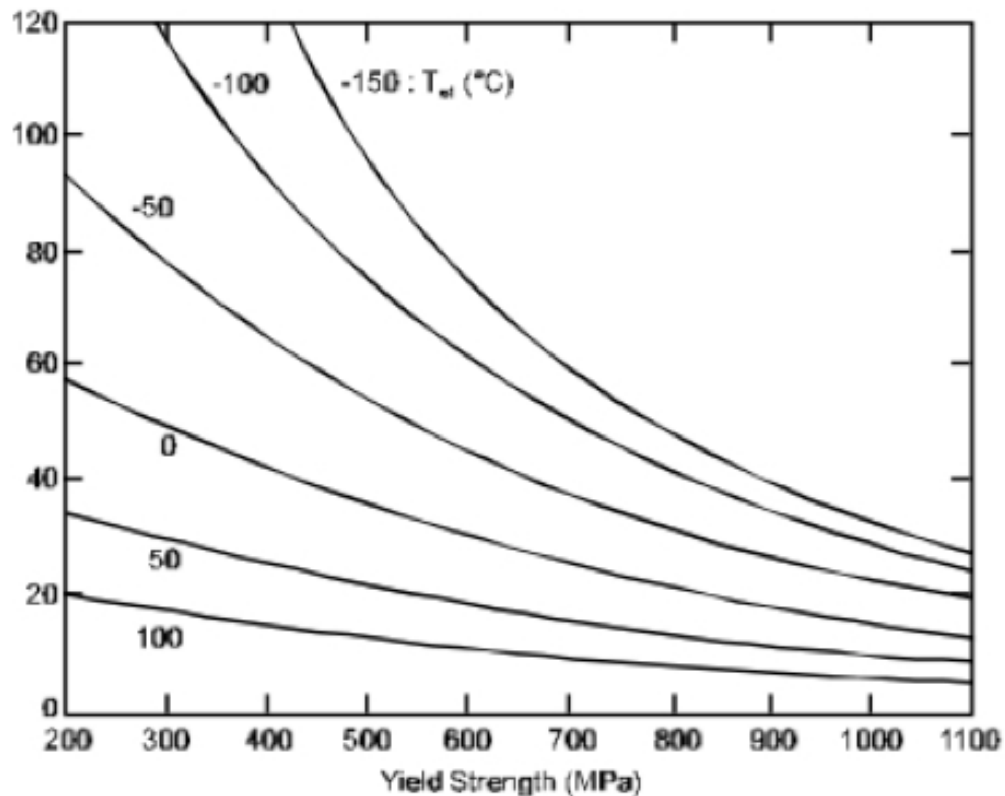
Hvor konstanten kan bli uttrykt i form av en referanse til overføringshastighetens omslagstemperatur. For kvasi-statisk belastning ($K_1 = 1\text{MPa}\sqrt{m} \text{ s}^{-1}$) kan referanse temperaturen T_0 kalles T_{01} . Ved å endre navnet på $(\ln A)$ i formel (27) til Γ gir dette følgende uttrykk for overføringshastighet induisert av temperatur forflytning:

$$\Delta T_0 = \frac{T_{01} \times \ln(K_1)}{\Gamma - \ln(K_1)} \quad (28)$$

Parameteren Γ kan beskrives med hensyn til flytegrensen og T_{01} på følgende måte:

$$\Gamma = 9,9 \exp\left[\frac{T_{01}}{190}\right]^{1,66} + \left[\frac{p_y}{722}\right]^{1,09} \quad (29)$$

[S.2]



Figur 48: Eksempel på omslagstemperatur som flytter seg på grunn av dynamisk belastning [S.2].

Figur 48 viser eksempler av kalkulererte verdier for ΔT_0 for et utvalg av T_0 temperaturer og flytegrense ved en spenningsrate.

Ved å kombinere formlene (28) og (29) muliggjør dette for en evaluering av skift i overføringshastigheten for T_0 basert på kunnskapen om overføringshastigheten, flytegrensen og T_{K100} ved kvasi-statisk overføringshastighet.

$$\Delta T_0 = \frac{T_{01} E \times \ln(K_1)}{[9,9 \exp]\left(\left(\frac{T_{01}}{190}\right)^{1,66} + \left[\frac{p_y}{722}\right]^{1,09}\right) - \ln(K_1)} \quad (30)$$

Forholdet mellom ε og K kan uttrykkes slik:

$$K = E \varepsilon \sqrt{\pi \cdot a} \quad (31)$$

[S.2]

9. Håndtering av SUB-SIZE Charpy verdier

Når Charpy slagseighets verdier kommer fra sub-size prøver, som vil si at prøvene er helt like standarden på 10x10mm eller at platetykkelsen er mindre enn 10mm, blir testing med Charpy prøvestaver vanskelig.

Platetykkelse $\leq 10\text{mm}$

I disse tilfellene må testingen forekomme med egne prøvestaver som på engelsk kalles for "sub-size specimen". utfordringene ligger i å estimere resultatene fra disse små prøvestavene til å korrespondere med de standard prøvestavene. Det er også svært vanskelig å ekstrapolere resultatene fra "sub-size" prøvene ut fra de standard prøvene [S.2].

Forflytningen i omslagstemperaturen assosiert med små Charpy prøvestaver, ΔT_{ss} kan beskrives ved:

$$\Delta T_{ss} = 51,4 \cdot \ln \left[2 \left(\frac{B_{ss}}{10} \right)^{0,25} - 1 \right] \quad (32)$$

B_{ss} = Tykkelsen til Charpy prøven (i mm)

[S.2]

Bruken av formel (32) fungerer på denne måten, for en prøvestav som har en tykkelse på $B = 2\text{mm}$:

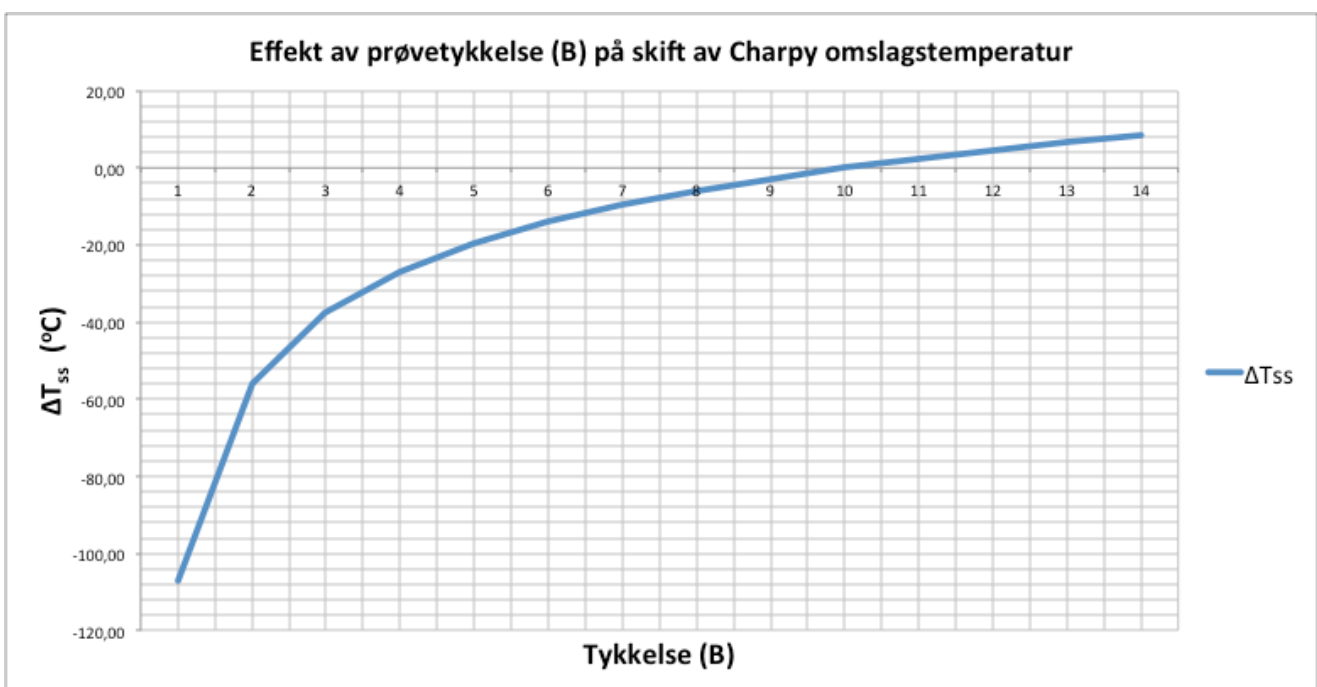
$$\begin{aligned} \Delta T_{ss} &= 51,4 \cdot \ln \left[2 \left(\frac{B_{ss}}{10} \right)^{0,25} - 1 \right] \\ \Delta T_{ss} &= 51,4 \cdot \ln \left[2 \left(\frac{2}{10} \right)^{0,25} - 1 \right] \\ \Delta T_{ss} &= -55,83^\circ\text{C} \end{aligned}$$

I tabell 16 er utregnede verdier for ΔT_{ss} for prøvetykkelser fra 2 til 14mm. Her har jeg benyttet meg av regneark i Excel for å regne ut de tilhørende verdiene. Resultatet av dette er vist i figur 49.

Tabell 16: Ved bruk av regneark i Excel er det regnet ut verdier for ΔT_{ss} for prøvetykkelser fra 2 til 14mm.

Tykkelse B (mm)	Forflytning i omslagstemperatur ΔT_{ss} (°C)
2	-55,83
3	-37,71
4	-27,07
5	-19,69
6	-14,09
7	-9,62
8	-5,90
9	-2,74
10	0
11	2,42
12	4,58
13	6,54
14	8,31

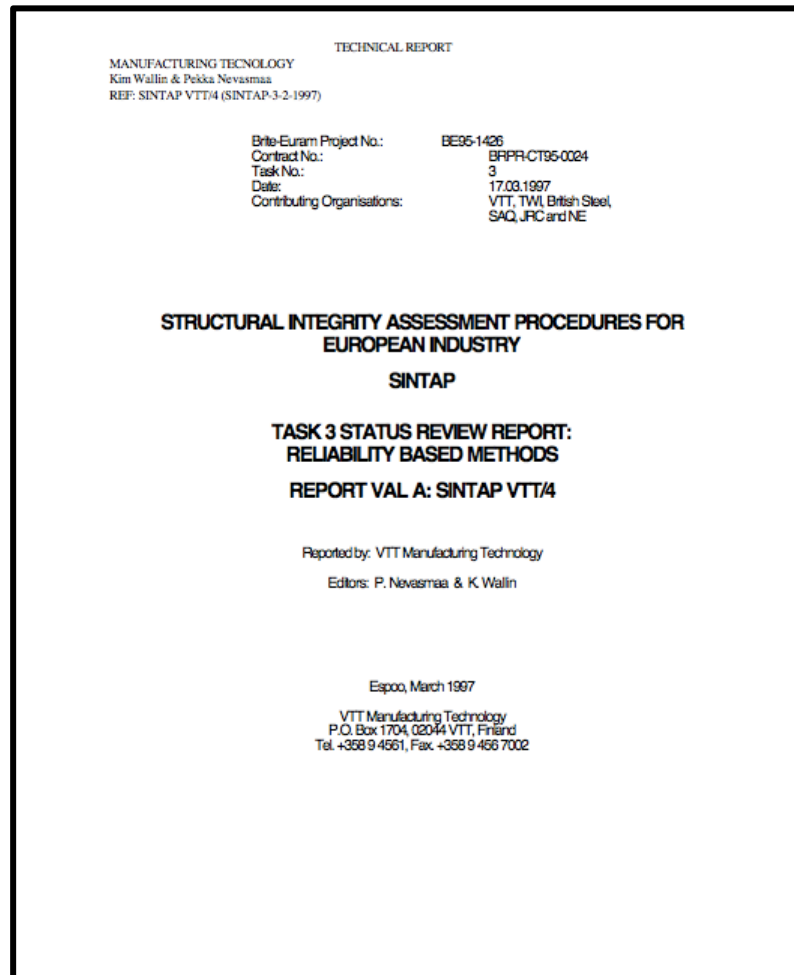
Utrykket fra formel (32) og tilhørende verdier fra tabell 16 vises i figur 49:



Figur 49: Økende tykkelse og effekten av temperatur skift [S.2].

10. Andre estimeringsteknikker

Det finnes mange korrelasjoner mellom slagseighet og bruddseighet. Jeg har gjennom hele denne rapporten så langt kun hatt hovedfokus på estimeringsteknikkene stadfestet i den Britiske Standarden BS 7910. I dette kapitlet har jeg valgt å plukke ut noen av de mest sentrale korrelasjonene å presentert dem her. Estimeringsteknikkene presentert i dette kapitlet stammer fra denne rapporten, vist i figur 50:



Figur 50: SINTAP rapport som gir en god oversikt over andre estimeringsteknikker utover de som er beskrevet i BS 7910 og SINTAP Task 3,3 [S.10].

10.1. Generiske korrelasjoner

Korrelasjoner som er anvendbare på det nedre grense området og for den nedre delen av omslagsområdet tar vanligvis form på denne måten:

$$K_{1C} = aC_v^b$$

Hvor C_v er Charpy slagseighet for en prøvestav med standard V-kjerv. Bokstavene a og b er konstanter. Bruddseigheten kan også fremstå som CTOD og uttrykket ser dermed slik ut:

$$\log \delta_c = a + b \log C_v$$

Der (δ_c) er CTOD verdien, C_v er Charpy slagseigheten for en prøvestav med V-kjerv, a og b er konstanter.

Korrelasjoner for omslagsområdet tar som regel form på denne måten:

$$K_{1C}^2 = aC_v^b$$

Årsaken til at K_{1C} verdien er opphøyd i andre er fordi at man må ta hensyn til den skarpe økningen i bruddseighet etter hvert som omslagstemperaturen blir nådd [S.10].

Korrelasjoner for den øvre grensen pleier som regel å ta hensyn til flytegrensen og tar form slik:

$$\left(\frac{K_{1C}}{\sigma_y}\right)^2 = a\left(\frac{C_v}{\sigma_y} + b\right)$$

Denne kan løses på følgende måte for å få et estimat av bruddseigheten:

$$K_{1C} = \sqrt{a\left(\frac{C_v}{\sigma_y} + b\right)} \cdot \sigma_y$$

[S.10]

10.2. Estimeringsteknikker for det nedre grense området

Her er det listet opp et utvalg av ulike korrelasjoner tilpasset det nedre grense området. Teknikkene er hentet fra SINTAP Task 3 [S.10].

10.2.1. Chaudhuri:

Chaudhuri har utviklet en CTOD – slagseighets korrelasjoner for API X52 stål for gassrør som er 10mm tykke. Det er blitt foreslått 3 ulike korrelasjoner:

$$1. \log \delta_c = 1,14 \log C_v - 2,33 \text{ [mm, J]} \quad (33)$$

$$2. \log \delta_c = 1,30 \log C_v - 2,58 \text{ [mm, J]} \quad (34)$$

$$3. \log \delta_c = 1,06 \log C_v - 2,24 \text{ [mm, J]} \quad (35)$$

Formel (33) og (34) er anvendelige på HAZs som har duktile eller sprøe brudd. Formel (35) er for sveiste metaller.

10.2.2. Girenko:

Girenko har vurdert en rekke trykktanker og skipsstål med Charpy verdier fra 2 til 150 Joules, som gir en korrelasjon som følger:

$$K_{1C} = 17C_v^{0,5} = 17\sqrt{C_v} \quad (36)$$

10.2.3. Imai:

Imai gir en korrelasjon som dekker Charpy verdier fra 5 til 200 Joules:

$$\frac{K_{1C}^2}{\sigma} = 2,5C_v^{0,5} = \frac{K_{1C}^2}{\sigma} = 2,5\sqrt{C_v} \quad (37)$$

10.2.4. Logan:

Logan har avledet en korrelasjon ved bruk av høyste tekniske stål med flytegrenser mellom 820 – 1420 N/mm² og Charpy slagseighets verdier fra 7 – 37 Joules:

$$K_{1C} = 20,3C_v^{0,5} = 20,3\sqrt{C_v} \quad (38)$$

10.2.5. Sailors & Corton:

Et lignende uttrykk til Logan sin korrelasjon har blitt utledet av Sailors & Corten, ved bruk av stål som har flytegrenser mellom 410 – 815 N/mm²:

$$K_{1C} = 14,6C_v^{0,5} = 14,6\sqrt{C_v} \quad (39)$$

10.2.6. Barsom, Rolfe & Novak:

Barsom har utledet to korrelasjoner, dette for stål som har flytegrenser fra 270 – 1700 N/mm². Den første korrelasjonen er utledet for Charpy slagseighets verdier fra 4 – 82 Joules, den andre korrelasjonen for Charpy verdier fra 31 – 121 Joules. Disse er som følger:

$$1. K_{1C}^2 = 45,1C_v^{3/2} \quad (40)$$

$$2. \left(\frac{K_{1C}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,64\left(\frac{C_v}{\sigma_y} + 0,01\right) \quad (41)$$

Verdien 0,01 i formel (41) ble senere revidert til 0,02 av Roberts:



$$\left(\frac{K_{1c}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,64\left(\frac{C_v}{\sigma_y} + 0,02\right)$$

(42)

10.2.7. Exxon Fitness for Service Guide:

Exxon's Fitness for Service Guide gir en korrelasjon for et konservativt estimat av bruddseigheten:

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{650 C_v E}{1000}}$$

(43)

10.2.8. SINTAP:

SINTAP sin nedre grense korrelasjon som brukes i den Britiske Standarden BS 7910 og som er beskrevet tidligere i denne rapporten:

$$K_{mat_{25}} = 12\sqrt{C_v}$$

(8)

10.2.9. Roberts & Newton:

Dette er samme formel som brukes i den Britiske Standarden BS 7910 og beskrevet tidligere i rapporten:

$$\left(\frac{K_{1c}^2}{\sigma_y}\right) = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

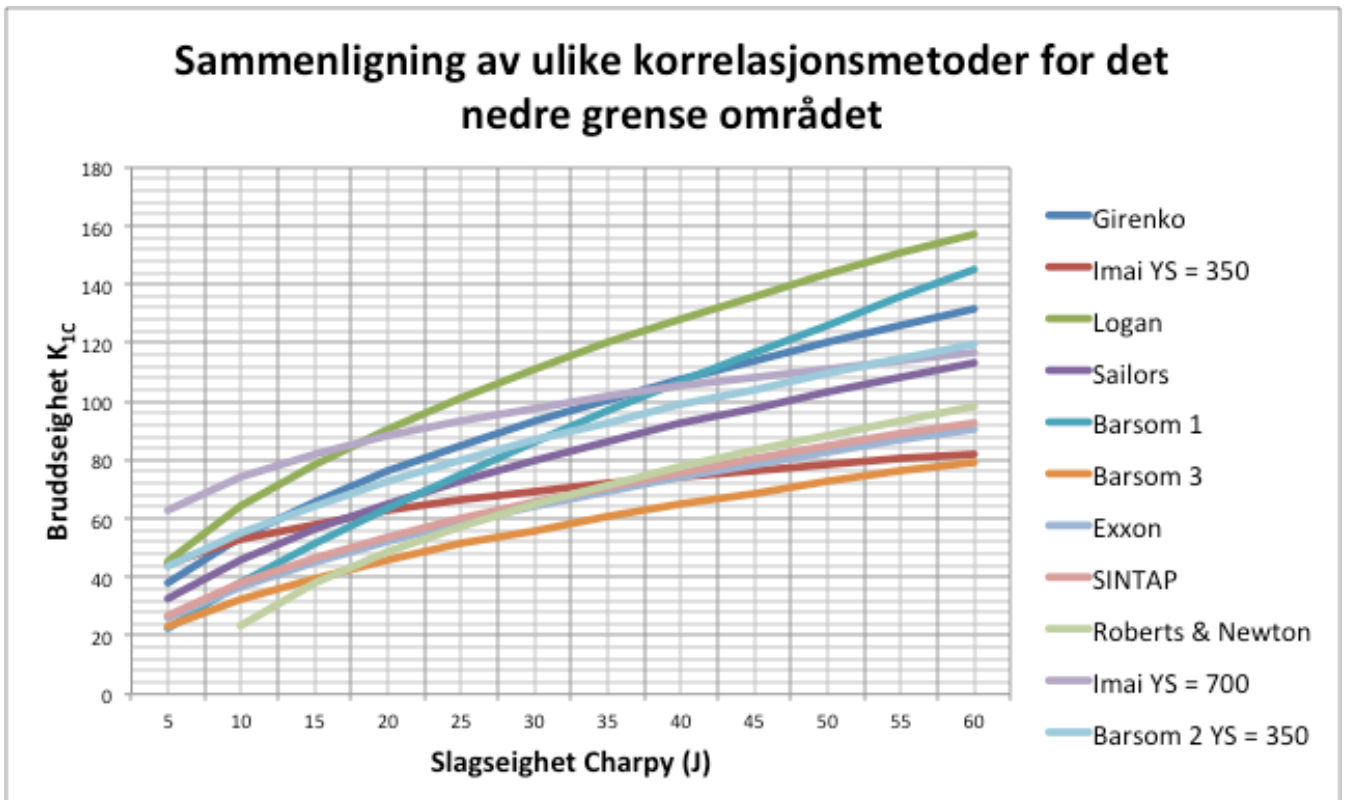
(20)

10.3. Sammenligning av de ulike nedre grense korrelasjonene

En oppsummering av korrelasjonsteknikkene for det nedre grense området er gitt i tabell 17. Sammenligning av de ulike korrelasjonene med estimerte verdier for K_{1C} med bruk av Charpy slagseighets verdier fra 5 - 50 Joules er gitt figur 51.

Tabell 17: Oversiktstabell for de presenterte estimeringsteknikkene for det nedre grense området [S.10].

Korrelasjons tittel	Korrelasjon	Flytegrense (N/mm ²)	Charpy verdier (J)	Enhet
Chaudhuri	$\log \delta_C = 1,14 \log C_v - 2,33$ [mm,J]	520	40 – 63	mm, J
	$\log \delta_C = 1,30 \log C_v - 2,58$ [mm,J]		24 – 35	
	$\log \delta_C = 1,06 \log C_v - 2,24$ [mm,J]		18 - 40	
Girenko	$K_{1C} = 17C_v^{0,5} = 17\sqrt{C_v}$	200-1700	2 - 150	MPa \sqrt{m} , J
Imai	$\frac{K_{1C}^2}{\sigma} = 2,5\sqrt{C_v}$	-	5 - 215	MPa \sqrt{m} , J, MPa
Logan	$K_{1C} = 20,3C_v^{0,5}$	820-1420	7 - 37	MPa \sqrt{m} , J
Sailors og Corten	$K_{1C} = 14,6C_v^{0,5}$	410-815	7 - 70	MPa \sqrt{m} , J
Barsom	$K_{1C}^2 = 45,1C_v^{3/2}$	270-1700	4 – 82	MPa \sqrt{m} , J, MPa
	$(\frac{K_{1C}}{\sigma_y})^2 = 0,64(\frac{C_v}{\sigma_y} + 0,01)$		31 - 121	
EXXON	$K_{1C} = \sqrt{\frac{650 C_v E}{1000}}$	-	-	MPa \sqrt{m} , J, MPa
SINTAP	$K_{mat_{25}} = 12\sqrt{C_v}$	-	-	MPa \sqrt{m} , J
Roberts & Newton	$(\frac{K_{1C}^2}{\sigma_y}) = 0,52(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02)$	-	-	MPa \sqrt{m} , J, MPa



Figur 51: Grafen viser de ulike korrelasjons metodene for det nedre grense området. Estimert bruddseighet K_{1C} med bruk av Charpy slagseighetsverdier fra 5 – 50 Joules [S.10].

Korrelasjonene for den nedre grensen følger generelt formelen beskrevet under:

$$K_{1C} = aC_v^b$$

Den mest konservative korrelasjonen er fra Exxon Fitness for Service Guide, formel (43) mens den minst konservative korrelasjonsformelen er den fra Logan, formel (38) sett ut fra figur 51 og stadfestet i SINTAP rapporten.

[S.10]

10.4. Estimeringsteknikker for det øvre grense området

Her er det listet opp et utvalg av ulike korrelasjoner tilpasset det øvre grense området. Estimeringsteknikkene er hentet fra SINTAP Task 3 [S.10].

10.4.1. Ito:

$$K_{1C}^2 = 2,9 \cdot 10^5 \left(\frac{C_v}{\sigma_y} \right)$$

(44)

10.4.2. Norris:

Norris har utledet en av de få korrelasjonene som er relatert til J_{1C} fra Charpy slagseighet. Korrelasjonen tillater Charpy slagseighets verdier fra 22 – 192 Joules:

$$J_{1C} = C_v \left(\frac{[\sigma_y + 1600]}{1300} \right) \quad (45)$$

10.4.3. Priest:

Priest har fremlagt en korrelasjon som er som følger:

$$\left(\frac{K_{1C}}{\sigma_y} \right)^2 = a \left(\frac{C_v}{\sigma_y} \right) - b \quad (46)$$

For stålplater, $a = 1,622$ og $b = 0,011$

For sveisemetall, $a = 0,65$ og $b = 0,00637$

10.4.4. Thorby:

Thorby har utledet en korrelasjon basert på resultatene fra prøver på HY60 og titanium, behandlet eksperiment stål med flytegrenser fra 400 til 600 N/mm² og Charpy slagseighets verdier helt opp til 85 Joules. Formelen er som følger:

$$K_{1C} = 16,9C_v^{0,534} \quad (47)$$

10.4.5. Witt:

$$K_{1C} = 2,78C_v - 3,93 \quad (48)$$

10.4.6. BS PD 6493-2:

Denne er tilsvarende til formelen brukt i den Britiske Standarden BS 7910 og er beskrevet tidligere i rapporten:

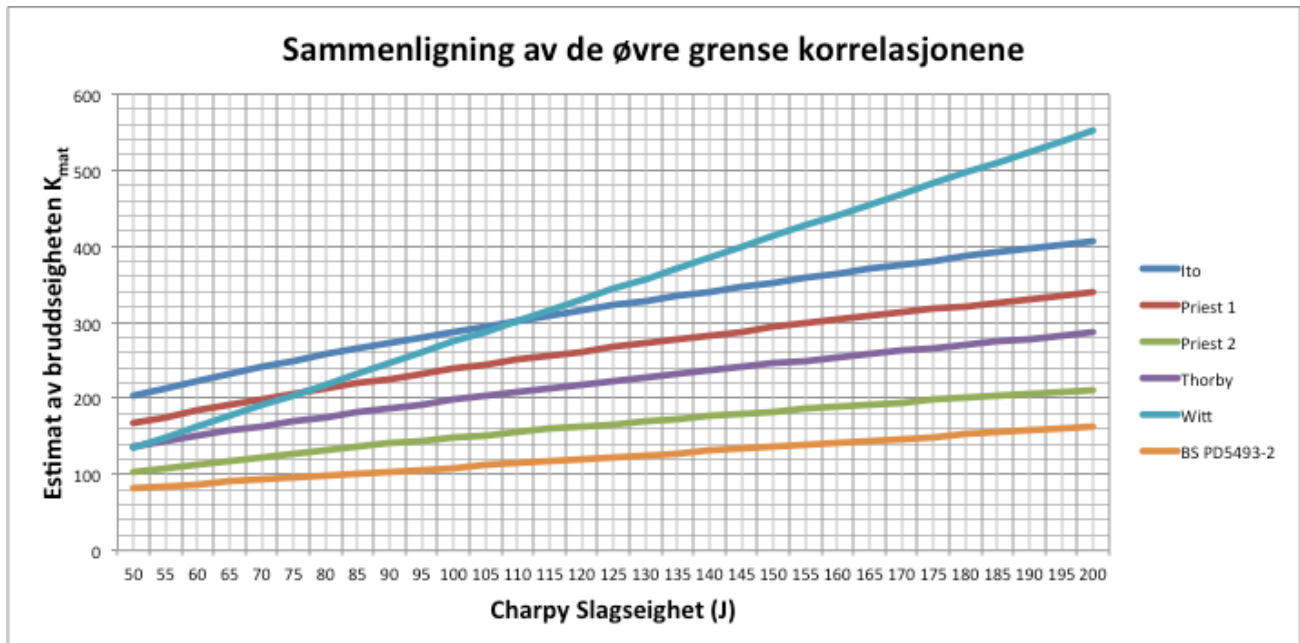
$$K_{1C} = 0,54C_v + 55 \quad (19)$$

10.5. Sammenligning av de ulike øvre grense korrelasjonene

En oversikt over de ulike korrelasjonsmetodene for den øvre grense er gitt i tabell 18. Estimeringer er gjort ved bruk av estimeringsteknikkene med bruk av Charpy slagseighets verdier fra 50 – 160 Joules. Resultatet er vist i figur 52. Det viser seg at korrelasjonsformelen gitt fra BS PD 6493-2 og BS 7910, også den formelen som er blitt brukt gjennomgående i denne rapporten er den korrelasjonsmetoden som gir de laveste estimatene av bruddseighet. Det vil si at den gir de mest konservative estimatene. Det er stor variasjon mellom de ulike korrelasjonsmetodene, som betyr at de ulike korrelasjonsteknikkene ikke korrelerer spesielt bra sammen [S.10].

Tabell 18: Oversiktstabell over de estimeringsteknikkene presentert for det øvre grense området [S.10].

Korrelasjons tittel	Korrelasjon	Flytegrense (N/mm ²)	Charpy verdier (J)	Enhet
Ito	$K_{1C}^2 = 2,9 \cdot 10^5 \left(\frac{C_v}{\sigma_y}\right)$	570 - 840	5 - 160	MPa \sqrt{m} , J, MPa
Norris	$J_{1C} = C_v \left(\frac{[\sigma_y + 1600]}{1300}\right)$	447 - 1696	22 - 192	N/mm, J, MPa
Priest	$\left(\frac{K_{1C}}{\sigma_y}\right)^2 = 1662 \left(\frac{C_v}{\sigma_y}\right) - 0,011$	190 - 320	5 - 120	MPa \sqrt{m} , J, MPa
	$\left(\frac{K_{1C}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,65 \left(\frac{C_v}{\sigma_y}\right) - 0,0064$	290 - 450		
Thorby	$K_{1C} = 16,9 \cdot C_v^{0,534}$	400 - 600	13 - 85	MPa \sqrt{m} , J
Witt	$K_{1C} = 2,78C_v - 3,93$	414 - 848	47 - 203	MPa \sqrt{m} , J
	$K_{1C} = (0,068C_v - 9,9)^2$			
PD 6493-2	$K_{1C} = 0,54C_v + 55$	< 480	0 - 250	MPa \sqrt{m} , J



Figur 52: Grafen over viser en sammenligning av alle de ulike korrelasjonsteknikkene for den øvre grense. Det er brukt Charpy slagseighets verdier fra 50 til 160 Joules [S.10].

Fra figur 52 kan man tydelig se at korrelasjonen fra BS PD5493-2 er den som er mest konservativ av dem alle, og gir konsekvent de laveste estimatene av bruddseighet. Den minst konservative av dem alle er Witt, som gir et markant høyere estimat av bruddseigheten [S.10]. Dette er også stadfestet i SINTAP rapporten.

10.6. Korrelasjoner som involverer skift i temperaturen:

Charpy slagseighets og bruddseighets kurver sammenlignes ved at man ser på en spesifikk temperatur for hver av omslagskurvene. Det vil si at man sammenligner de to omslagskurvene med hverandre. De temperaturer som brukes er temperaturer som korresponderer til:

- En spesifikk Charpy slagseighets verdi som gir 27/28 Joules.
- En spesifikk bruddseighets verdi ($K_{1C} = 100\text{MPa}\sqrt{m}$, $\delta_c = 0,1\text{mm}$).
- En spesifikk Charpy brudd temperatur (50% FATT).
- En ikke-bruddmekanisk referanse temperatur (Pellini NDTT).

[S.10]

10.6.1. ASME-PVRC:

PVRC (Pressure Vessels Research Committee) har utviklet en metode for å bestemme bruddseighet ved den nedre grensen fra Pellini NDTT [S.10] (Nil-Ductility Transition Temperature):

$$K_{1R} = 1,333e^{[0,0261(NDTT+89)]+29} \quad (49)$$

Korrelasjonen var utviklet for stål med flytegrense under 621 N/mm^2 . K_{1R} er en nedre grense av K_{1C} . Korrelasjonen avhenger av kjennskap til NDTT.

10.6.2. BS PD 6493-1:

En modifisert korrelasjon som stammer fra korrelasjonen i ASME-PVRC. NDTT er tatt ved temperaturen for Charpy ved 40 Joules.

$$K_{1C} = 1,333e^{[0,0261(T-T_{40J}+89)]+29} \quad (50)$$

10.6.3. Barsom:

Barsom har beskrevet en metode for å relatere Charpy slagseighet til statisk bruddseighet med hensyn til tøynings effekt ved skift i temperaturen på omslagstemperaturen. K_{1C} verdien er så korrelert til Charpy slagseigheter ved en høyere temperatur:

$$K_{1C}^2 = 105C_v \quad (51)$$

med: $\Delta T = 119 - 0,12\sigma_y$

for σ_y mellom 250 og 965 N/mm^2 , og hvis ikke er $\Delta T = 0$.

Korrelasjonen var utledet for flytegrenser mellom 250 og 1700 N/mm^2 .

10.6.4. Matsumoto:

Matsumoto har utledet en korrelasjon for den nedre grensen og for omslagsområdet for sveiste turbin stål. Korrelasjonen har blitt utledet for stålplater, sveisemetall og varme påvirkede soner (HAZ):

$$K_{1C} = 1,615e^{[0,038(T-FATT+140)]+31} \quad (52)$$

Der FATT står for "Fracture Appearance Transition Temperature" [S.10].

10.6.5. Oda:

Oda har utledet to korrelasjoner for CTOD basert på resultatene fra prøver gjort på stål med flytegrenser fra 276 til 834 N/mm^2 og Charpy slagseighets verdier fra 5 til 200 Joules. De to uttrykkene er som følger:

$$1. \quad \delta_C = 3,44 \cdot 10^{-2} \ln\left(256 \cdot \frac{C_v}{\sigma_y}\right) \quad (53)$$

$$2. \quad \delta_C = 1,8 \cdot \left(\frac{C_v}{\sigma_y}\right) - 0,1 \quad (54)$$

Formel (53) er for det sprø området og formel (54) er for det duktile området.

10.6.6. Braid:

Braid har utført en rekke Charpy og CTOD prøver på ulike sveiser og korrelert verdier for CTOD fra -10°C til -35°C med 35 Joules Charpy omslagstemperatur. Verdier for A_0 og A_f er ikke gitt.

$$\log \delta = A_0 + A_f \log (T_{35J}) \quad (55)$$

Tabell 19: Oversiktstabell over alle korrelasjonsmetodene som involverer skift i temperaturen [S.10].

Korrelasjons tittel	Korrelasjon	Flytegrense (N/mm^2)	Charpy verdier (J)	Enhet
ASME-PVRC	$K_{1R} = 1,333e^{[0,0261(NDTT+89)]+29}$	< 621	-	$\text{MPa}\sqrt{m}$, $^{\circ}\text{C}$
BS PD 6493-1	$K_{1C} = 1,333e^{[0,0261(T-T_{40J}+89)]+29}$	< 480	-	$\text{MPa}\sqrt{m}$, $^{\circ}\text{C}$
Barsom	$K_{1C}^2 = 105C_v$ $\Delta T = 119 - 0,12\sigma_y$, $\sigma_y < 965\text{N/mm}^2$	250 - 1700	3 - 61	$\text{MPa}\sqrt{m}$, J, MPa, $^{\circ}\text{C}$
Matsumoto	$K_{1C} = 1,615e^{[0,038(T-FATT+140)]+31}$	-	-	$\text{MPa}\sqrt{m}$, $^{\circ}\text{C}$
Oda	$\delta_c = 3,44 \cdot 10^{-2} \text{Ln}(256 \cdot \frac{C_v}{\sigma_y})$ $\delta_c = 1,8 \cdot \left(\frac{C_v}{\sigma_y}\right) - 0,1$ $\Delta T = FATT - T_f$	276 - 834	3 - 50 (sprøtt) 50 - 200 (Duktilt)	mm, J, MPa
Sanz	$T_{K100\text{MPa}\sqrt{m}} = 1,37 T_{CV28J} + 9$ $K_{1C} = 19\sqrt{C_v}$	274 - 820	5 - 50	$\text{MPa}\sqrt{m}$, J
Wallin	$T_{K100\text{MPa}\sqrt{m}} = T_{K27J} - 18$	300 - 1500	-	$^{\circ}\text{C}$
Wallin	$K_0 = 31 + 77e^{[0,019(T-T_0)]}$	300 - 1500	-	$\text{MPa}\sqrt{m}$, $^{\circ}\text{C}$
Wallin	$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{(0,019(T-T_{28}+18))}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4}$	3000 - 1500	-	$\text{MPa}\sqrt{m}$, $^{\circ}\text{C}$, mm

11. Caser

11.1. Bakgrunn

Målet med casene er å gi en grei og oversiktlig innføring i bruken av formelverket. Casene tar kun utgangspunkt i estimeringsteknikkene fra den Britiske Standarden BS 7910. Casene er praktiske eksempler som viser bruken av formelverket.

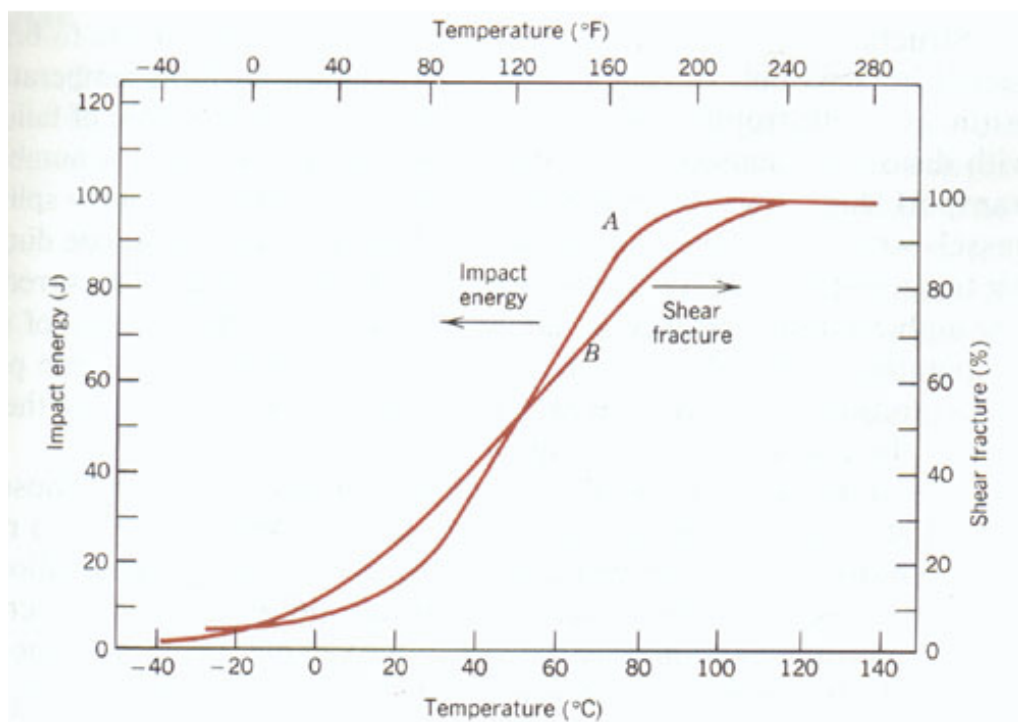
11.2. Case 1: Bruk av estimeringsteknikker

11.2.1. Bakgrunn:

Målet med denne casen er å vise hvordan man anvender estimeringsteknikkene. Jeg ser helt bort fra hva slags type stål det er. Tidligere i rapporten stadfestet jeg at den beste formen for Charpy slagseighets verdier man kan ha er ved at man har en fullstendig Charpy omslagskurve, tilsvarende den som er vist i figur 53. I alle de tre fasene; nedre grenseområde, omslagsområde og i det øvre grenseområde har jeg gitt tre regne eksempler på hvordan man kommer frem til en estimert K_{mat} verdi for bruddseigheten. Charpy slagseighetsverdiene er lest av grafen i figur 53.

11.2.2. Antagelser:

- Antar 25mm prøver, ser derfor bort fra tykkelseskorrigerings.
- Leser av verdier for slagseighet fra grafen i figur 53.
- Omslagstemperatur omtrent ved $T_{27/28J} = 35^{\circ}\text{C}$ (Estimert ut fra grafen).



Figur 53: Figuren viser en vanlig S-formet Charpy slagseighetskurve [12].

Dette er det som anses som en fullstendig Charpy omslagskurve, som viser slagenergien målt i joules og skjærbrudd målt i prosent. En slik fullstendig omslagskurve er det som anses å være av ”høyeste” kvalitet når det gjelder tilgjengelig Charpy data, dette ble ytterligere forklart under delkapitlet ”Ulike typer Charpy data”, delkapittel 3,2.

11.2.3. Del 1: Nedre grense område

Formelen er som følger for nedre grenseområde:

$$K_{mat} = 12 \cdot \sqrt{C_v}$$

Ved $T = -40^\circ C$:

$$\begin{aligned} K_{mat} &= 12 \cdot \sqrt{C_v} \\ K_{mat} &= 12 \cdot \sqrt{2} \\ K_{mat} &= 16,97 \approx 17 \text{ MPa}\sqrt{m} \end{aligned}$$

Ved $T = -30^\circ C$:

$$\begin{aligned} K_{mat} &= 12 \cdot \sqrt{C_v} \\ K_{mat} &= 12 \cdot \sqrt{6} \\ K_{mat} &= 29,39 \approx 29,4 \text{ MPa}\sqrt{m} \end{aligned}$$

Ved $T = -20^\circ C$:

$$\begin{aligned} K_{mat} &= 12 \cdot \sqrt{C_v} \\ K_{mat} &= 12 \cdot \sqrt{8} \\ K_{mat} &= 33,94 \approx 34 \text{ MPa}\sqrt{m} \end{aligned}$$

11.2.4. Del 2: Omslagsområde / The Master Curve Approach

Omslagstemperaturen ved $T_{27/28J}$ er $T = 35^\circ C$.

Velger å bruke kumulativ bruddsannsynlighet $P_f = 5\%$ som er anbefalt ifølge den Britiske Standarden BS 7910 [S.6].

Formelen er som følger:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(T - T_{27/28J} + 18^\circ C)\}}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1 - P_f}\right)\right\}^{1/4}$$

$$T_{27/28J} = 35^\circ C$$

$$T - T_{27/28J} + 18^\circ C = T - 35 + 18 = T - 17^\circ C$$

Ved $T = 40^\circ C$:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(T - 17)\}}] \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1 - 0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{[0,019(40-17)]} \cdot \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 87,73 \approx 87,7 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Ved T = 45°C:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{[0,019(T-17)]}] \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{[0,019(45-17)]} \cdot \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 93,38 \approx 93,4 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Ved T = 50°C:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{[0,019(T-17)]}] \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{[0,019(50-17)]} \cdot \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 99,59 \approx 99,6 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

11.2.5. Del 3: Øvre grense område

Formelen er som følger:

$$K_{mat} = 0,54 \cdot C_v + 55$$

Ved T = 70°C:

$$K_{mat} = 0,54 \cdot C_v + 55$$

$$K_{mat} = 0,54 \cdot 85 + 55$$

$$K_{mat} = 100,9 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Ved T = 80°C:

$$K_{mat} = 0,54 \cdot C_v + 55$$

$$K_{mat} = 0,54 \cdot 90 + 55$$

$$K_{mat} = 103,6 \approx 104 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Ved $T = 100^{\circ}\text{C}$:

$$K_{mat} = 0,54 \cdot C_v + 55$$

$$K_{mat} = 0,54 \cdot 98 + 55$$

$$K_{mat} = 107,92 \approx 108 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

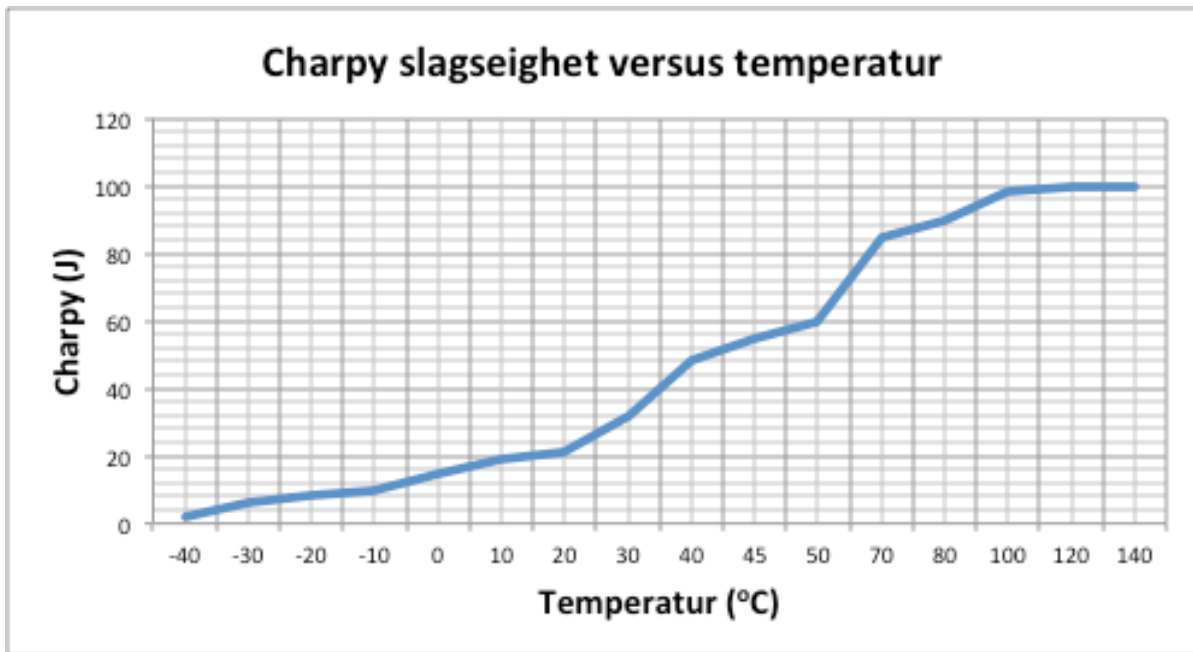
11.2.6. Del 4: Sammenligning

Ved bruk av regneark i Excel har jeg regnet ut alle de estimerte K_{mat} verdiene ved bruk av Charpy slagseighets verdier fra 2 til 100 Joules. Resultatet av dette kan ses i tabell 20 og i figur 54 og 55 nedenfor.

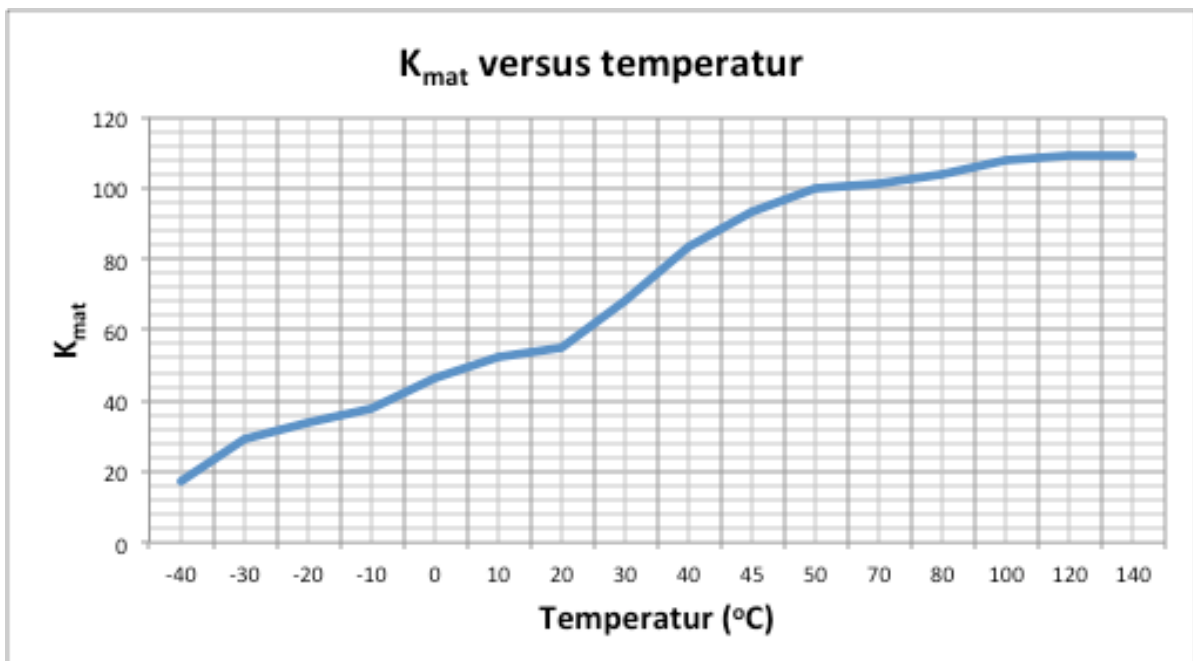
Tabell 20: Tabellen viser avleste Charpy slagseigheter og den estimerte bruddseigheten K_{mat} utregnet ved hjelp av regneark i Excel.

Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Charpy (J)	K_{mat} ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
-40	2	17
-30	6	29,4
-20	8	34
-10	10	38
0	15	46,5
10	19	52,3
20	21	55
30	32	67,9
40	48	83,1
45	55	93,4
50	60	99,6
70	85	100,9
80	90	104
100	98	108
120	100	109
140	100	109

Verdiene i tabell 20 har blitt plottet i to grafer, en Charpy versus temperatur og en der jeg ser på den estimerte bruddseigheten versus temperatur. Grafene er plottet i figur 54 og 55.



Figur 54: Slagseighetskurven. Årsaken til at grafen fremstår som noe ujevn kan være på grunn av for få eller unøyaktig avleste verdier. Selv om grafen fremstår som noe ujevn kan man fortsatt se konturene fra en S-formet kurve.



Figur 55: De estimerte K_{mat} verdiene plottet mot temperatur. Grafen viser dermed bruddseighetskurven til stålet ved bruk av de estimerte verdiene.

11.3. Case 2: Ulike Charpy kurver med spesifisert tykkelse

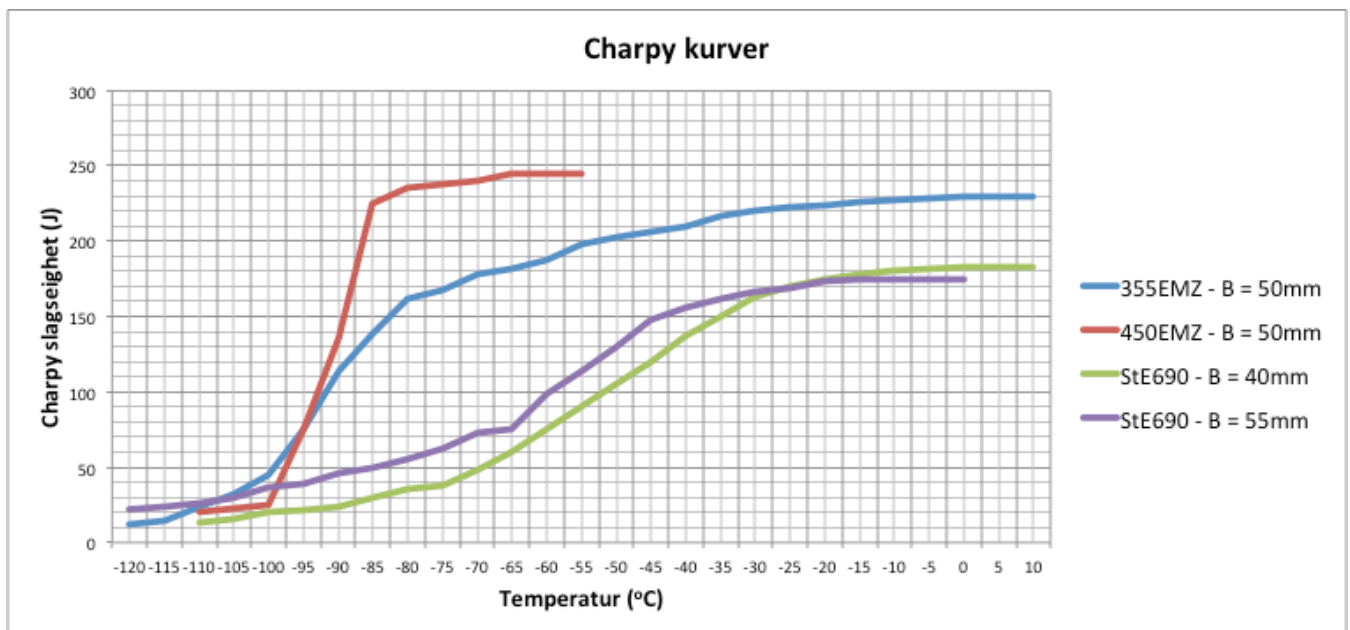
11.3.1. Bakgrunn:

I denne casen ser jeg på tre forskjellige konstruksjonsstål med ulike tykkelser. Jeg ønsker å estimere bruddseighetsverdiene for de ulike konstruksjonsstålene ved bruk av korrelasjonsformlene. I figur 56 er det gitt fullstendige Charpy slagseighetskurver for de ulike konstruksjonsstålene fra -120°C til 10°C . I tabell 21 er de avleste verdiene for Charpy slagseighet ved de ulike temperatuere.

De ulike konstruksjonsstålene er:

- 355EMZ med tykkelse $B = 50\text{mm}$
- 450EMZ med tykkelse $B = 50\text{mm}$
- StE690 med tykkelse $B = 40\text{mm}$
- StE690 med tykkelse $B = 55\text{mm}$

Ytterligere informasjon vedrørende konstruksjonsstålene er gitt i vedlegg B.



Figur 56: Charpy slagseighetskurver til de fire ulike konstruksjonsstålene [S.12].

Verdiene for slagseighet er lest av grafen i figur 56. Materialbetingelsene kan ses i tabell 22.

Tabell 21: Avleste Charpy slagseighets verdier for alle de fire konstruksjonsstålene, verdiene er lest av grafen i figur 56.

Charpy				
Temperatur (°C)	355EMZ B = 50mm (J)	450EMZ B = 50mm (J)	StE690 B = 40mm (J)	StE690 B = 55mm (J)
-120	12	-	-	22
-115	15	-	-	24
-110	24	20	13	26
-105	32	23	16	30
-100	45	25	20	37
-95	75	75	22	39
-90	114	136	24	46
-85	138	225	30	50
-80	162	235	35	55
-75	167	238	38	62
-70	178	240	48	73
-65	181	245	60	75
-60	187	245	75	98
-55	198	245	90	114
-50	202	-	105	130
-45	206	-	122	148
-40	210	-	137	156
-35	216	-	150	162
-30	220	-	163	166
-25	222	-	170	169
-20	224	-	175	173
-15	226	-	178	174
-10	227	-	180	174
-5	228	-	182	175
0	230	-	183	175
5	230	-	183	-
10	230	-	183	-

Tabell 22: Materialbetingelsene som temperatur, tykkelse, flytegrense og temperaturen ved 27/28 Joules er oppgitt i tabellen under [S.2].

Ståltype	Temperatur (°C)	Tykkelse (mm)	Flytegrense (MPa)	T_{27/28 J} (°C)
355EMZ	25	50	366	-105
450EMZ	25	50	490	-98
StE690	25	40	735	-85
StE690	25	55	803	-102

11.3.2. Del 1: 355EMZ, B = 50mm

Jeg regner ut den første verdien for alle de tre områdene. Deretter bruker jeg regneark i Excel for å estimere de resterende avleste verdiene. De tilhørende verdiene kan ses i tabell 23, 24 og 25 nedenfor.

Nedre grense:

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{C_v}$$

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{12}$$

$$K_{mat,25} = 41,57 MPa \sqrt{m}$$

Tykkelseskorrigerings:

$$K_{mat} = [(K_{mat,25} - 20) \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4}] + 20$$

$$K_{mat} = [(41,57 - 20) \left(\frac{25}{50}\right)^{1/4}] + 20$$

$$K_{mat} = 38,14 MPa \sqrt{m}$$

Omslagsområde:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(T - T_{27/28J} + 18^\circ C)\}}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{ \ln \left(\frac{1}{1 - P_f} \right) \right\}^{1/4}$$

$$T_{27/28J} = -105^\circ C$$

$$T - T_{27/28J} + 18^\circ C$$

$$T - (-105^\circ C) + 18^\circ C$$

$$T + 105^\circ C + 18^\circ C$$

$$T + 123^\circ C$$

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019 \cdot (-105 + 123)\}}] \left(\frac{25}{50}\right)^{1/4} \left\{ \ln \left(\frac{1}{1 - 0,05} \right) \right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{\{0,019 \cdot 18\}} \left(\frac{25}{50}\right)^{1/4} \left\{ \ln \left(\frac{1}{1 - 0,05} \right) \right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 74,38 MPa \sqrt{m}$$

Øvre grense:

$$K_{mat} = 0,54 \cdot C_v + 55$$

Ved T = -60°C

$$K_{mat} = 0,54 \cdot (187) + 55$$

$$K_{mat} = 155,98 MPa \sqrt{m}$$

Tabell 23: De estimerte K_{mat} verdiene for det nedre grense område.

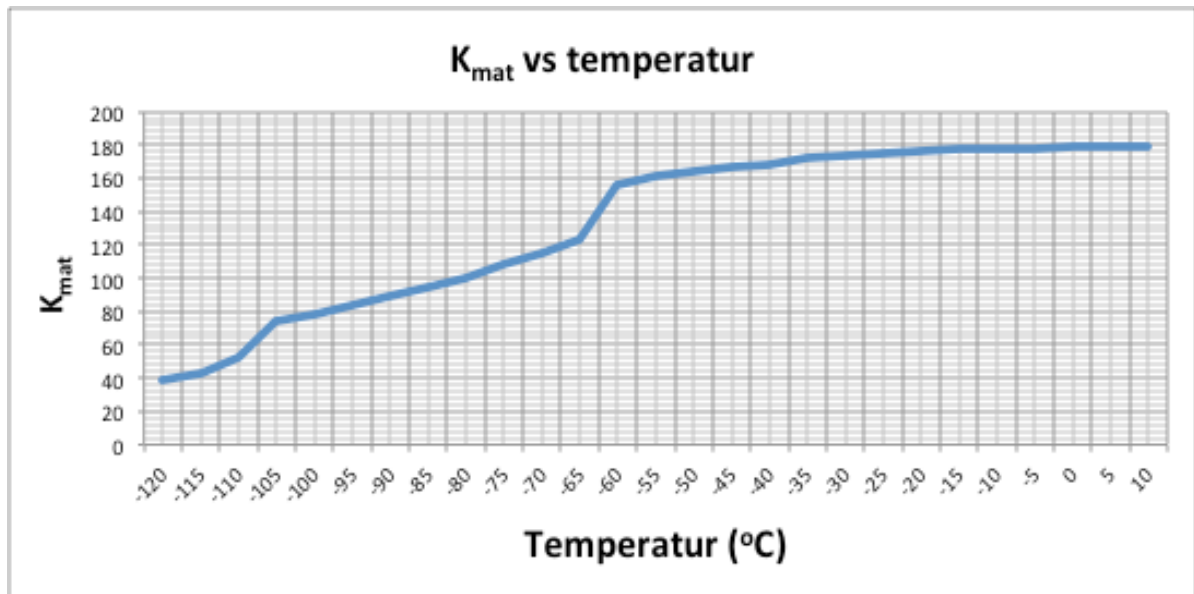
Nedre grense			
Temperatur ($^{\circ}C$)	Charpy (J)	$K_{mat,25}$ ($MPa\sqrt{m}$)	K_{mat} ($MPa\sqrt{m}$)
-120	12	41,57	38,14
-115	15	46,48	42,26
-110	24	58,79	52,62

Tabell 24: De estimerte K_{mat} verdiene for omslagsområde.

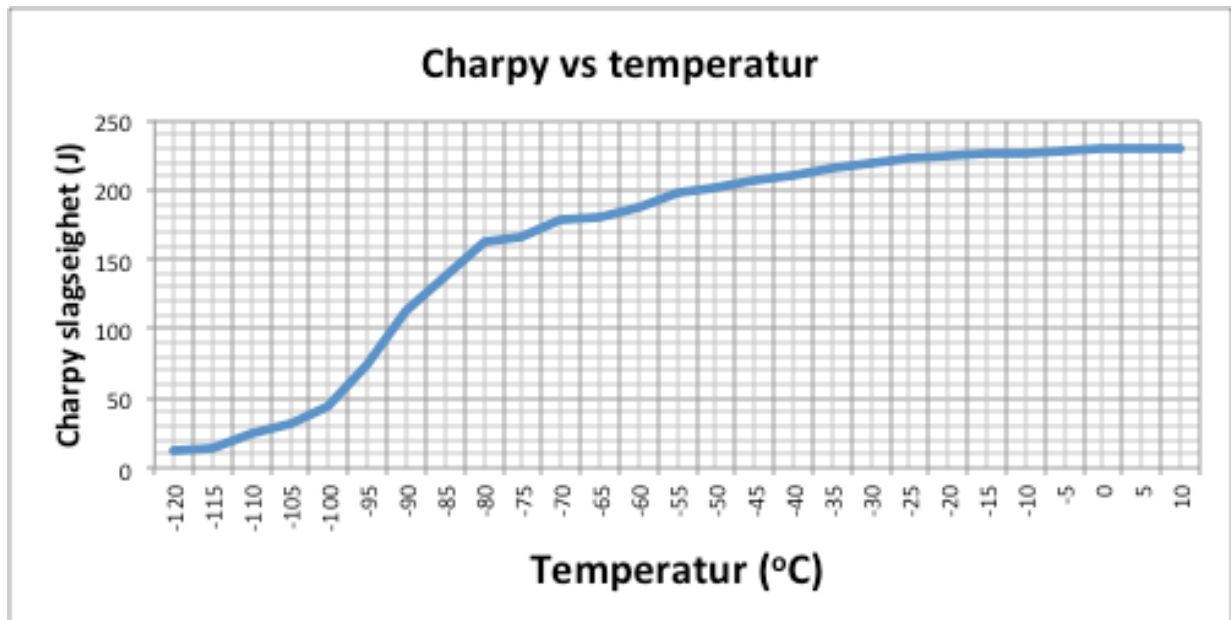
Omslagsområde		
Temperatur ($^{\circ}C$)	Charpy (J)	K_{mat} ($MPa\sqrt{m}$)
-105	32	74,38
-100	45	78,70
-95	75	83,46
-90	114	88,62
-85	138	94,43
-80	162	100,75
-75	167	107,71
-70	178	115,35
-65	181	123,76

Tabell 25: De estimerte K_{mat} verdiene for det øvre grense område.

Øvre grense		
Temperatur ($^{\circ}C$)	Charpy (J)	K_{mat} ($MPa\sqrt{m}$)
-60	187	155,98
-55	198	161,92
-50	202	164,08
-45	206	166,24
-40	210	168,4
-35	216	171,64
-30	220	173,8
-25	222	174,88
-20	224	175,96
-15	226	177,04
-10	227	177,58
-5	228	178,12
0	230	179,2
5	230	179,2
10	230	179,2



Figur 57: De estimerte K_{mat} verdiene plottet versus temperatur. Grafen viser dermed materialets bruddseighetskurve.



Figur 58: Slagseighetskurven for 355EMZ, plottet med de avleste verdiene. Stemmer bra overens med kurven i figur 56.

11.3.3. Del 2: 450EMZ, B = 50mm

Nedre grense:

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{C_v}$$

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{20}$$

$$K_{mat,25} = 53,67 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$

Tykkelseskorrigering:

$$K_{mat} = \left[(K_{mat,25} - 20) \left(\frac{25}{B} \right)^{1/4} \right] + 20$$

$$K_{mat} = [(53,67 - 20) \left(\frac{25}{50}\right)^{1/4}] + 20$$

$$K_{mat} = 48,31 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Omslagsområde:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(T - T_{28J} + 18^\circ\text{C})\}}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1 - P_f}\right)\right\}^{1/4}$$

$$\begin{aligned} T_{27/28J} &= -98^\circ\text{C} \\ T - T_{27/28J} + 18^\circ\text{C} & \\ T - (-98^\circ\text{C}) + 18^\circ\text{C} & \\ T + 98^\circ\text{C} + 18^\circ\text{C} & \\ T + 116^\circ\text{C} & \end{aligned}$$

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019 \cdot (-95 + 116)\}}] \left(\frac{25}{50}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1 - 0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{\{0,019 \cdot 21\}} \left(\frac{25}{50}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1 - 0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 76,92 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Øvre grense:

$$K_{mat} = 0,54 \cdot C_v + 55$$

Ved T = -75°C

$$\begin{aligned} K_{mat} &= 0,54 \cdot (238) + 55 \\ K_{mat} &= 183,52 \text{ MPa}\sqrt{m} \end{aligned}$$

Tabell 26: De estimerte K_{mat} verdiene for det nedre grense område.

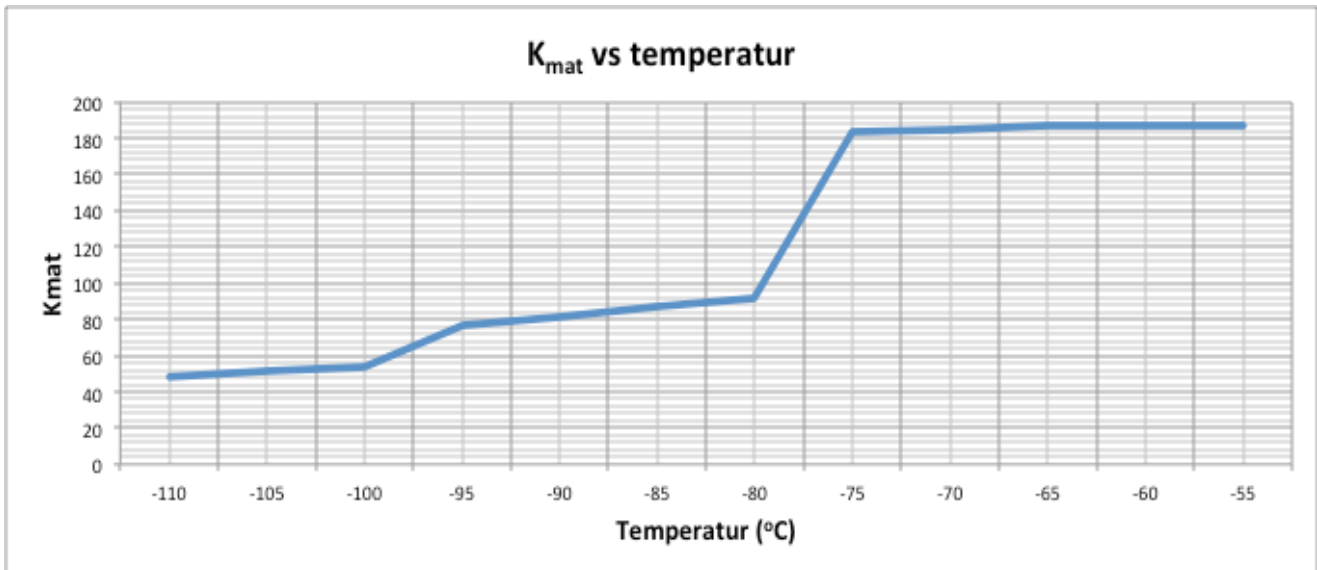
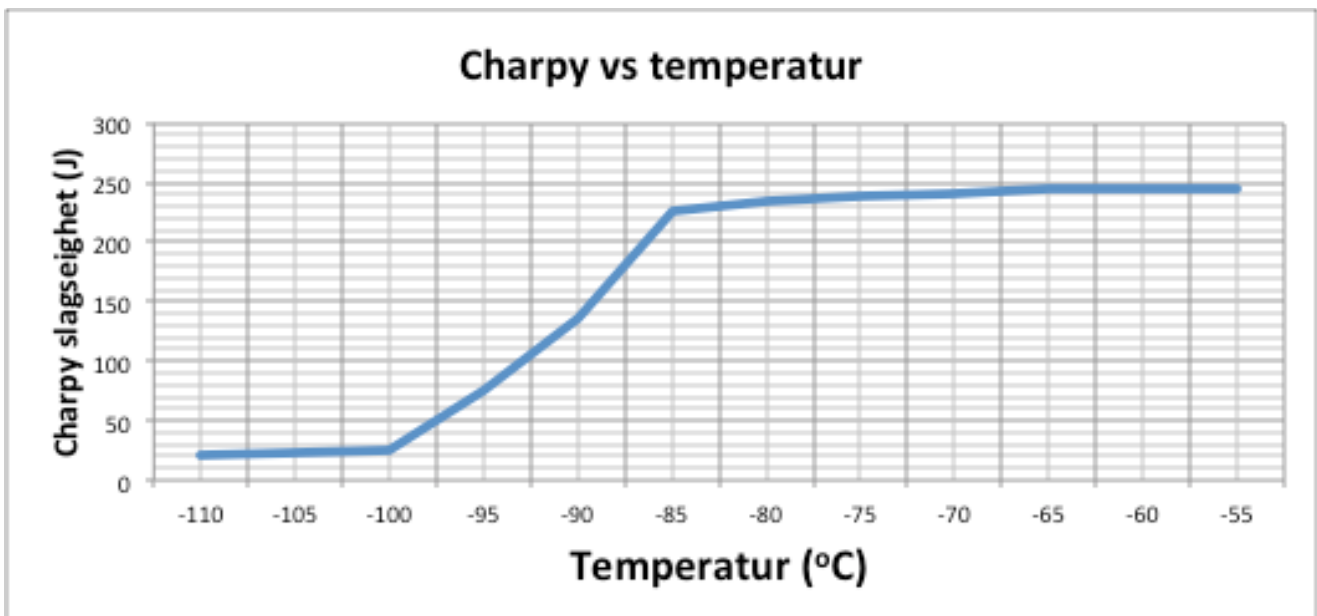
Nedre grense			
Temperatur (°C)	Charpy (J)	$K_{mat,25}$ (MPa \sqrt{m})	K_{mat} (MPa \sqrt{m})
-110	20	53,67	48,31
-105	23	57,55	51,58
-100	25	60	53,64

Tabell 27: De estimerte K_{mat} verdiene for omslagsområde.

Omslagsområde		
Temperatur (°C)	Charpy (J)	K_{mat} (MPa \sqrt{m})
-95	75	76,92
-90	136	81,5
-85	225	86,53
-80	235	92,07

Tabell 28: De estimerte K_{mat} verdiene for det øvre grense område.

Øvre grense		
Temperatur (°C)	Charpy (J)	K_{mat} (MPa \sqrt{m})
-75	238	183,52
-70	240	184,6
-65	245	187,3
-60	245	187,3
-55	245	187,3

Figur 59: De estimerte K_{mat} verdiene plottet versus temperaturen. Kurven fremstår som noe hakkete og ujevn, men man kan fortsatt se konturene av en S-formet kurve.

Figur 60: Charpy slagseighetskurven for 450EMZ, med de avleste verdiene. Stemmer bra overens med figur 56.

11.3.4. Del 3: StE690, B = 40mm**Nedre grense:**

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{C_v}$$

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{13}$$

$$K_{mat,25} = 43,27 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

Tykkelseskorrigerings:

$$K_{mat} = [(K_{mat,25} - 20) \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4}] + 20$$

$$K_{mat} = [(43,27 - 20) \left(\frac{25}{40}\right)^{1/4}] + 20$$

$$\mathbf{K_{mat} = 40,69 \text{ MPa} \sqrt{m}}$$

Omslagsområde:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(T - T_{27/28J} + 18^\circ\text{C})\}}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{ \ln\left(\frac{1}{1 - P_f}\right) \right\}^{1/4}$$

$$T_{27/28J} = -85^\circ\text{C}$$

$$T - T_{27/28J} + 18^\circ\text{C}$$

$$T - (-85^\circ\text{C}) + 18^\circ\text{C}$$

$$T + 85^\circ\text{C} + 18^\circ\text{C}$$

$$T + 103^\circ\text{C}$$

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019 \cdot (-85 + 103)\}}] \left(\frac{25}{40}\right)^{1/4} \left\{ \ln\left(\frac{1}{1 - 0,05}\right) \right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{\{0,019 \cdot 20\}} \left(\frac{25}{40}\right)^{1/4} \left\{ \ln\left(\frac{1}{1 - 0,05}\right) \right\}^{1/4}$$

$$\mathbf{K_{mat} = 76,87 \text{ MPa} \sqrt{m}}$$

Øvre grense:

$$K_{mat} = 0,54 \cdot C_v + 55$$

Ved T = -45°C

$$K_{mat} = 0,54 \cdot (122) + 55$$

$$\mathbf{K_{mat} = 120,88 \text{ MPa} \sqrt{m}}$$

Tabell 29: De estimerte K_{mat} verdiene for det nedre grense.

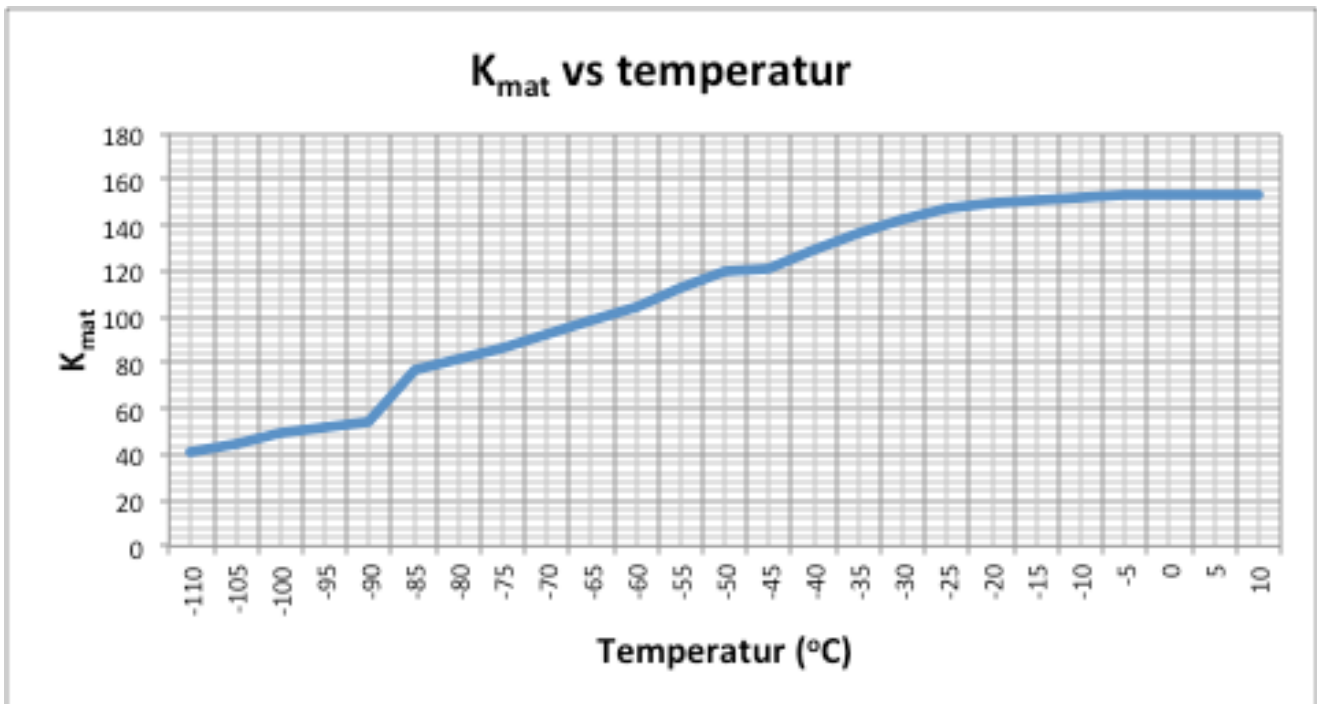
Nedre grense			
Temperatur ($^{\circ}C$)	Charpy (J)	$K_{mat,25}$ ($MPa\sqrt{m}$)	K_{mat} ($MPa\sqrt{m}$)
-110	13	43,27	40,69
-105	16	48	44,90
-100	20	53,67	49,93
-95	22	56,28	52,26
-90	24	58,79	54,49

Tabell 30: De estimerte K_{mat} verdiene for omslagsområde.

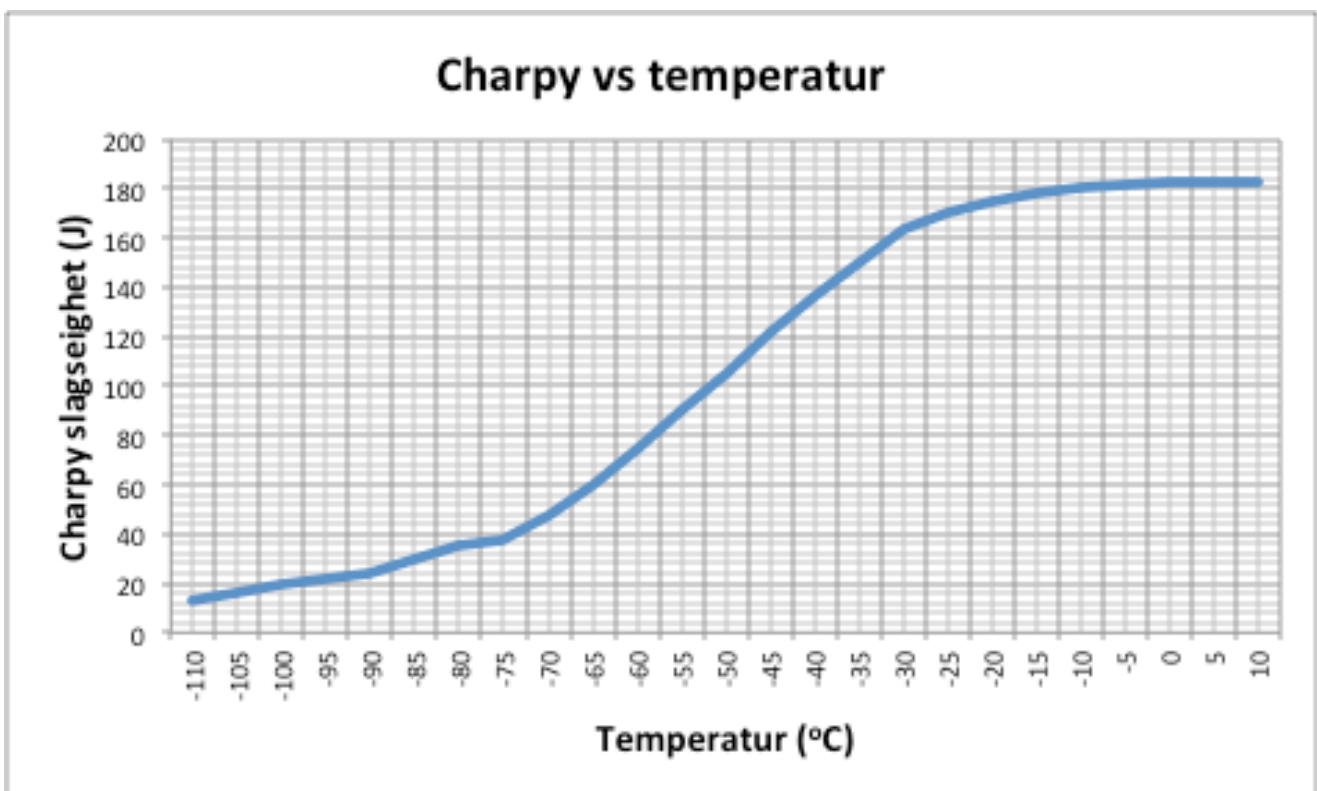
Omslagsområde		
Temperatur ($^{\circ}C$)	Charpy (J)	K_{mat} ($MPa\sqrt{m}$)
-85	30	76,87
-80	35	81,44
-75	38	86,47
-70	48	91,99
-65	60	98,07
-60	75	104,76
-55	90	112,11
-50	105	120,19

Tabell 31: De estimerte K_{mat} verdiene for den øvre grense.

Øvre grense		
Temperatur ($^{\circ}C$)	Charpy (J)	K_{mat} ($MPa\sqrt{m}$)
-45	122	120,88
-40	137	128,98
-35	150	136
-30	163	143
-25	170	146,8
-20	175	149,5
-15	178	151,12
-10	180	152,2
-5	182	153,28
0	183	153,82
5	183	153,82
10	183	153,82



Figur 61: De estimerte K_{mat} verdiene plottet versus temperaturen. I denne kurven er det vanskeligere å skille mellom de ulike områdene.



Figur 62: Charpy slagseighetskurven for StE690 med tykkelse $B = 40\text{mm}$. Stemmer bra overens med figur 56.

11.3.5. Del 4: StE690, B = 55mm

Nedre grense:

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{C_v}$$

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{22}$$

$$K_{mat,25} = 56,28 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

Tykkelseskorrigerings:

$$K_{mat} = [(K_{mat,25} - 20) \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4}] + 20$$

$$K_{mat} = [(56,28 - 20) \left(\frac{25}{55}\right)^{1/4}] + 20$$

$$K_{mat} = 49,79 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

Omslagsområde:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(T-T_{27/28J}+18^\circ\text{C})\}}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4}$$

$$T_{27/28J} = -102^\circ\text{C}$$

$$T - T_{27/28J} + 18^\circ\text{C}$$

$$T - (-102^\circ\text{C}) + 18^\circ\text{C}$$

$$T + 102^\circ\text{C} + 18^\circ\text{C}$$

$$T + 120^\circ\text{C}$$

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019 \cdot (-100+120)\}}] \left(\frac{25}{55}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{\{0,019 \cdot 20\}} \left(\frac{25}{55}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 75 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

Øvre grense:

$$K_{mat} = 0,54 \cdot C_v + 55$$

Ved $T = -55^\circ\text{C}$

$$K_{mat} = 0,54 \cdot (130) + 55$$

$$K_{mat} = 125,2 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

Tabell 32: De estimerte K_{mat} verdiene for det nedre grense.

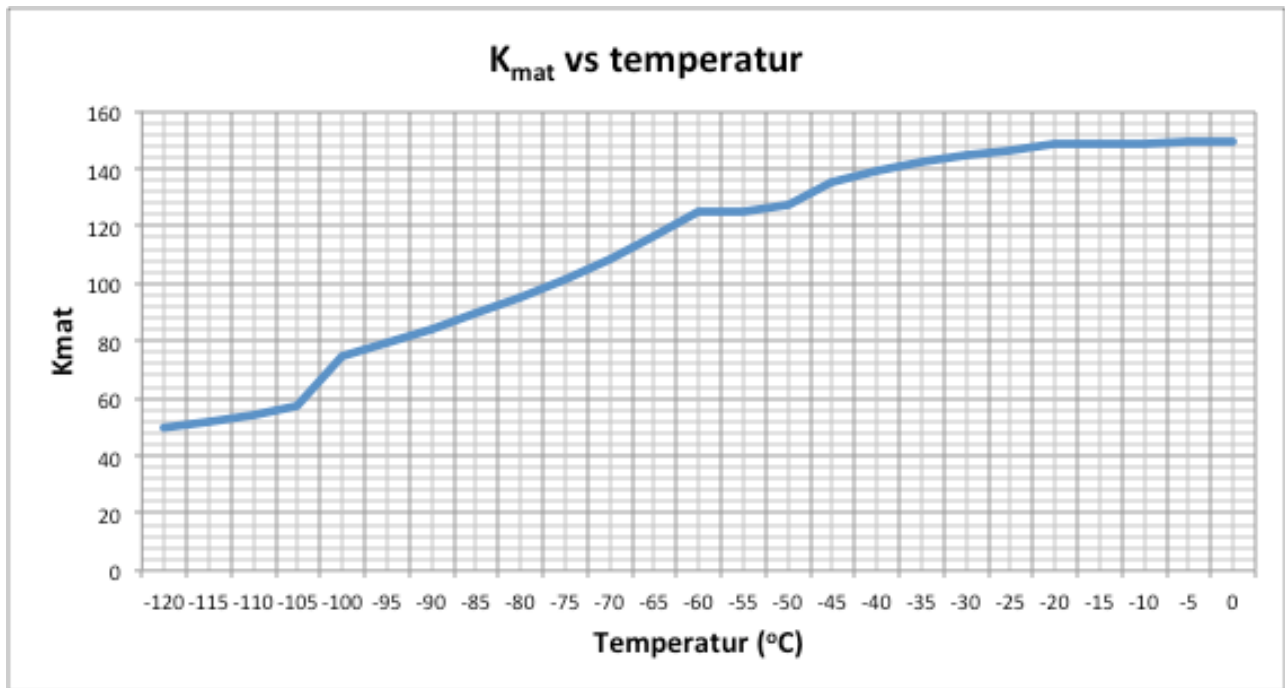
Nedre grense			
Temperatur ($^\circ\text{C}$)	Charpy (J)	$K_{mat,25}$ ($\text{MPa} \sqrt{m}$)	K_{mat} ($\text{MPa} \sqrt{m}$)
-120	22	56,28	49,79
-115	24	58,79	51,85
-110	26	61,19	53,82
-105	30	65,73	57,55

Tabell 33: De estimerte K_{mat} verdiene for omslagsområde.

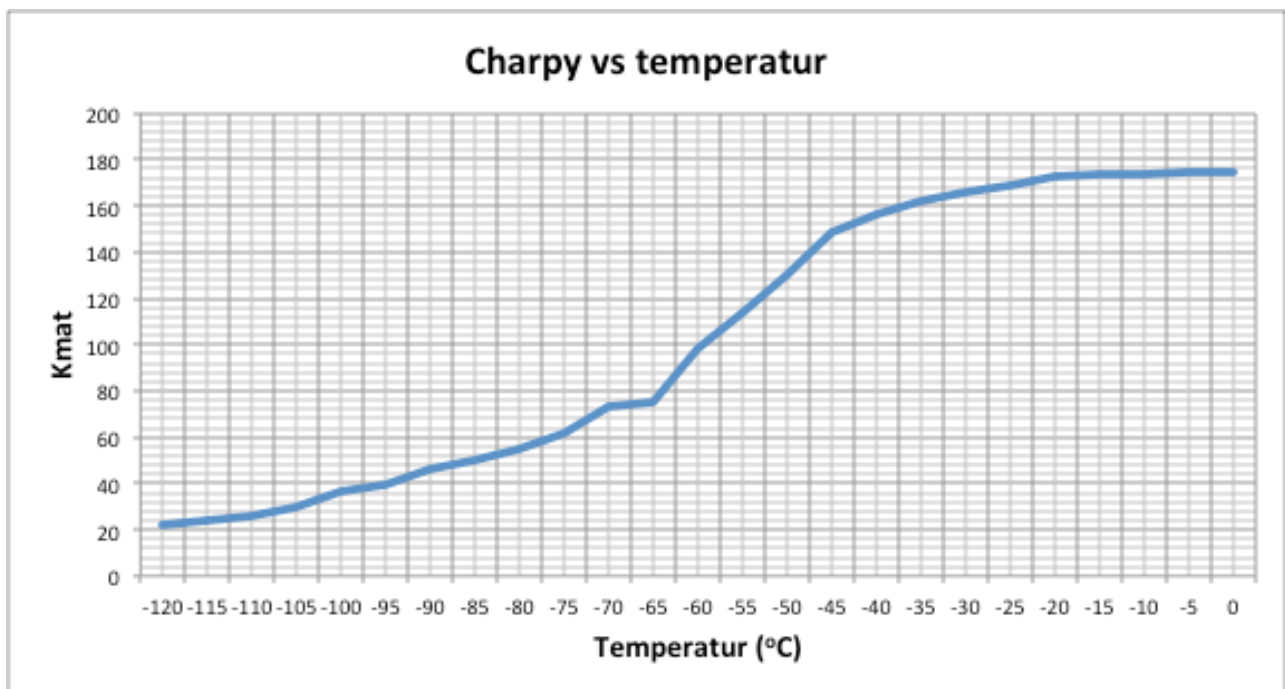
Omslagsområde		
Temperatur ($^{\circ}C$)	Charpy (J)	K_{mat} ($MPa\sqrt{m}$)
-109	37	75
-95	39	79,38
-90	46	84,2
-85	50	89,51
-80	55	95,34
-75	62	101,75
-70	73	108,8
-65	75	116,55
-60	98	125

Tabell 34: De estimerte K_{mat} verdiene for den øvre grense.

Øvre grense		
Temperatur ($^{\circ}C$)	Charpy (J)	K_{mat} ($MPa\sqrt{m}$)
-55	130	125,2
-50	134	127,36
-45	148	134,92
-40	156	139,24
-35	162	142,48
-30	166	144,64
-25	173	146,26
-20	174	148,42
-15	174	148,96
-10	174	148,96
-5	175	149,5
0	175	149,5



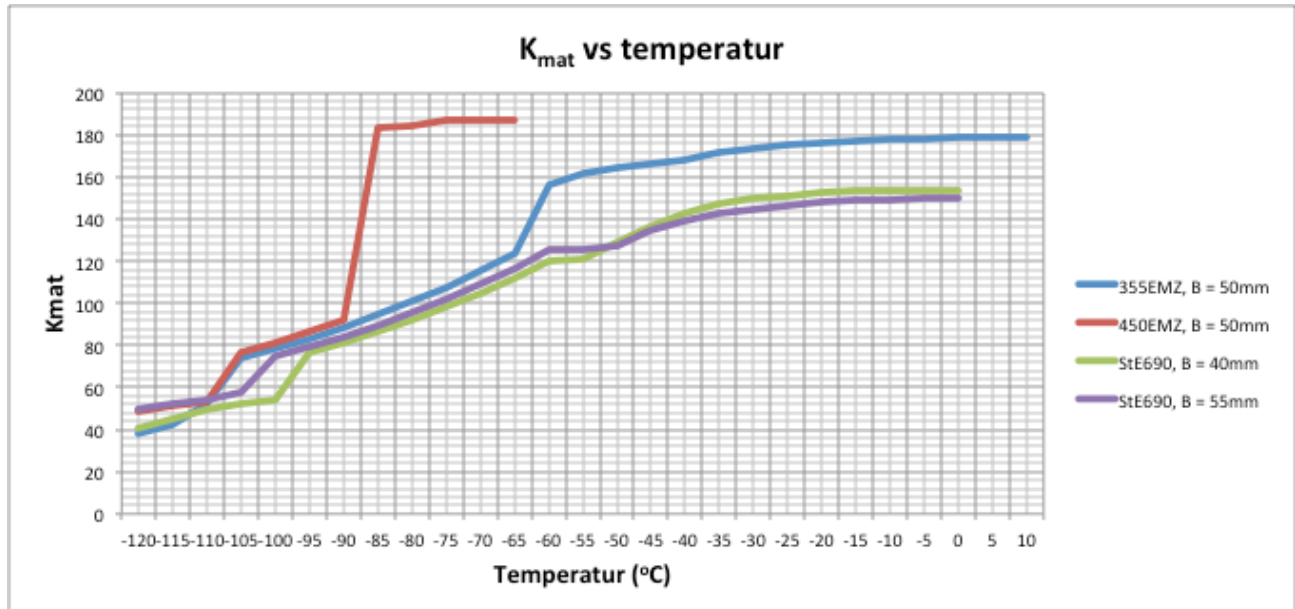
Figur 63: De estimerte K_{mat} verdiene plottet mot temperaturen.



Figur 64: Charpy slagseighetskurven for StE690 med tykkelse B = 50mm. Stemmer bra overens med figur 56.

11.3.6. Del 5: Sammenligning

Alle de estimerte bruddseighetene K_{mat} for de ulike konstruksjonsstålene er plottet versus temperatur i figur 65. Dermed gir grafen et uttrykk for bruddseighetskurvene til de fire konstruksjonsstålene.



Figur 65: De estimerte K_{mat} verdiene for alle de fire konstruksjonsstålene plottet versus temperatur.

Tabell 35: Tabellen viser den estimerte bruddseigheten K_{mat} for alle de utvalgte temperaturene.

Temperatur (°C)	355EMZ B = 50mm (MPa√m)	450EMZ B = 50mm (MPa√m)	StE690 B = 40mm (MPa√m)	StE690 B = 55mm (MPa√m)
-120	38,14	-	-	49,79
-115	42,26	-	-	51,85
-110	52,62	48,31	40,69	53,82
-105	74,38	51,58	44,90	57,55
-100	78,7	53,64	49,93	75
-95	83,46	76,92	52,26	79,38
-90	88,62	81,5	54,49	84,2
-85	94,43	86,53	76,87	89,51
-80	100,75	92,07	81,44	95,34
-75	107,71	183,52	86,47	101,75
-70	115,35	184,6	91,99	108,8
-65	123,76	187,3	98,07	116,55
-60	155,98	187,3	104,76	125,08
-55	161,92	187,3	112,11	125,2
-50	164,08	-	120,19	127,36

-45	166,24	-	120,88	134,92
-40	168,4	-	128,98	139,24
-35	171,64	-	136	142,48
-30	173,8	-	143	144,64
-25	174,88	-	146,8	146,26
-20	175,96	-	149,5	148,42
-15	177,04	-	151,12	148,96
-10	177,58	-	152,2	148,96
-5	178,12	-	153,28	149,5
0	179,2	-	153,82	149,5
5	179,2	-	153,82	-
10	179,2	-	153,82	-

11.3.7. Del 6: Bruk av øvre grense korrelasjon med flytegrense

Viser bruken av formelverket for øvre grense korrelasjon når man tar hensyn til flytegrensen. Flytegrensen for de ulike konstruksjonsstålene er gitt i tabell 22. Jeg viser hvordan jeg regner ut den første verdien for alle konstruksjonsstålene. Deretter bruker jeg regneark i Excel. Resten av de utregnede verdiene kan ses i tabellene 36, 37, 38 og 39 nedenfor. Jeg benytter følgende formel:

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

StE690, B = 40mm:

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

$$\sigma_y = 735MPa$$

$$C_v = 122 \text{ Joules}$$

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

$$\frac{K_{mat}}{\sigma_y} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)}$$

$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)} \cdot \sigma_y$$

$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{122}{735} - 0,02\right)} \cdot 735$$

$$K_{mat} = 202,51 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

De resterende verdiene er regnet ut ved bruk av regneark i Excel og er gitt i tabell 36:

Tabell 36: De avleste Charpy slagseighetsverdiene og den estimerte K_{mat} verdien for alle temperaturene. Her har jeg benyttet meg av regneark i Excel.

StE690, B = 40mm			
Temperatur (°C)	Charpy (J)	R _e (MPa)	K _{mat} (MPa√m)
-45	122	735	202,51
-40	137	735	216,2
-35	150	735	227,4
-30	163	735	238,08
-25	170	735	243,63
-20	175	735	247,52
-15	178	735	249,83
-10	180	735	251,35
-5	182	735	252,87
0	183	735	253,62
5	183	735	253,62
10	183	735	253,62

StE690, B = 55mm:

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

$$\sigma_y = 803 \text{ MPa}$$

$$C_v = 130 \text{ Joules}$$

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

$$\frac{K_{mat}}{\sigma_y} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)}$$

$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)} \cdot \sigma_y$$

$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{130}{803} - 0,02\right)} \cdot 803$$

$$K_{mat} = 218,12 \text{MPa}\sqrt{m}$$

Tabell 37: De avleste Charpy slagseighetsverdiene og den estimerte K_{mat} verdien for alle temperaturene.

StE690, B = 55mm			
Temperatur (°C)	Charpy (J)	R _e (MPa)	K _{mat} (MPa√m)
-55	130	803	218,12
-50	134	803	221,92
-45	148	803	234,72
-40	156	803	241,73
-35	162	803	246,86
-30	166	803	250,22
-25	173	803	255,99
-20	174	803	256,81
-15	174	803	256,81
-10	174	803	256,81
-5	175	803	257,62
0	175	803	257,62

355EMZ, B = 50mm:

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

$$\sigma_y = 366 \text{MPa}$$

$$C_v = 187 \text{Joules}$$

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

$$\frac{K_{mat}}{\sigma_y} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)}$$

$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)} \cdot \sigma_y$$

$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{187}{366} - 0,02\right)} \cdot 366$$

$$K_{mat} = 184,92 \text{MPa}\sqrt{m}$$

Tabell 38: De avleste Charpy slagseighetsverdiene og den estimerte K_{mat} verdien for alle temperatuere.

355EMZ, B = 50mm			
Temperatur (°C)	Charpy (J)	R_e (MPa)	K_{mat} (MPa\sqrt{m})
-60	187	366	184,92
-55	198	366	190,5
-50	202	366	192,49
-45	206	366	194,46
-40	210	366	196,4
-35	216	366	199,29
-30	220	366	201,19
-25	222	366	202,13
-20	224	366	203,07
-15	226	366	204,01
-10	227	366	204,47
-5	228	366	204,94
0	230	366	205,87
5	230	366	205,87
10	230	366	205,87

450EMZ, B = 50mm:

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

$$\sigma_y = 490MPa$$

$$C_v = 238 \text{ Joules}$$

$$\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)$$

$$\frac{K_{mat}}{\sigma_y} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)}$$

$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0,02\right)} \cdot \sigma_y$$

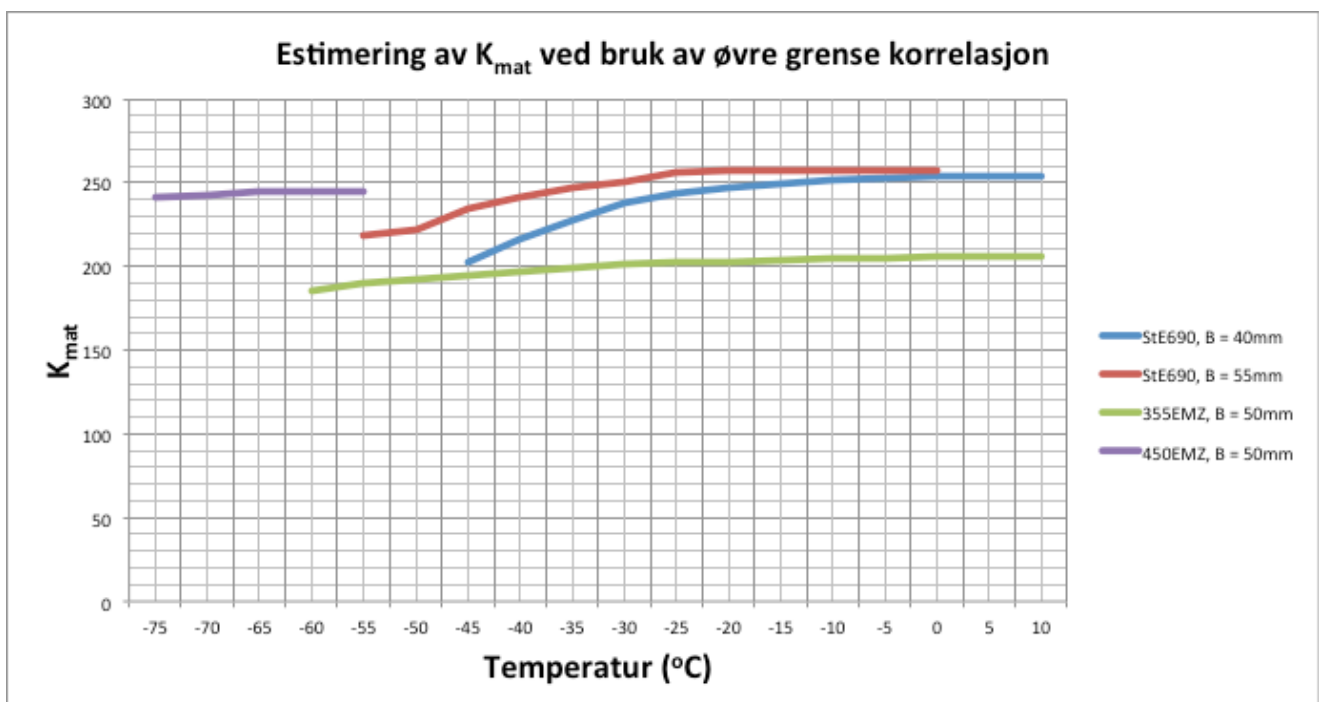
$$K_{mat} = \sqrt{0,52\left(\frac{238}{490} - 0,02\right)} \cdot 490$$

$$K_{mat} = 241,13MPa\sqrt{m}$$

Tabell 39: De avleste Charpy slagseighetsverdiene og den estimerte K_{mat} verdien for alle temperatuene.

450EMZ, B = 50mm			
Temperatur (°C)	Charpy (J)	R_e (MPa)	K_{mat} (MPa \sqrt{m})
-75	238	490	241,13
-70	240	490	242,19
-65	245	490	244,8
-60	245	490	244,8
-55	245	490	244,8

11.3.8. Del 6.1: Sammenligning



Figur 66: Alle de estimerte K_{mat} verdiene for alle de fire konstruksjonsstålene plottet mot temperatur. Årsaken til at noen av kurvene er ved forskjellige temperaturer avhenger helt av hvilke temperaturer Charpy verdiene har blitt avlest.

Årsaken til at kurvene i figur 66 er så ”flate” er fordi alle er innenfor det øvre grense området. De representerer alle bare det øvre partiet på omslagskurven. Dette ser ut til å stemme bra.

11.4. Case 3: Konvertere CTOD til K_{mat}

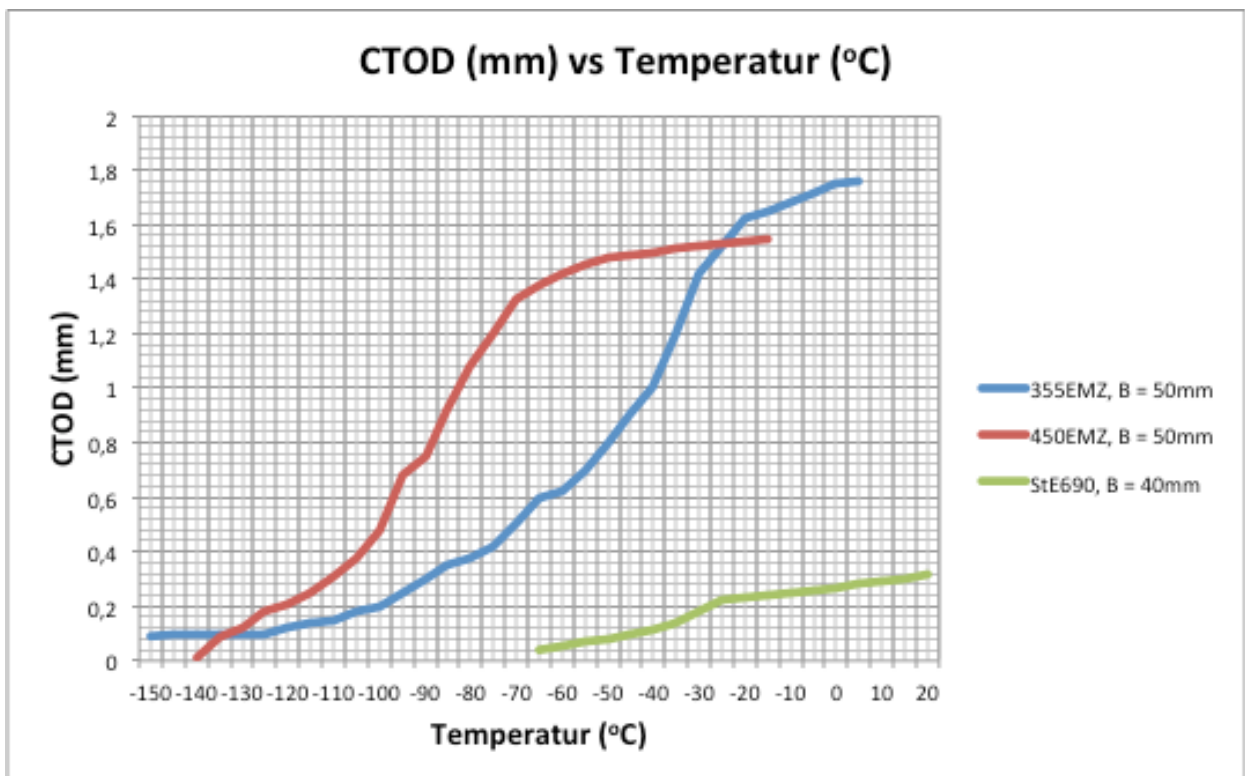
11.4.1. Bakgrunn:

I denne casen har jeg tenkt å konvertere CTOD til K_{mat} verdier. Jeg har tenkt å gjøre dette for tre ulike konstruksjonsstål med ulike tykkelser og ved ulike temperaturer. Bruker følgelig de tilhørende konverteringsformlene fra delkapittel 7,2.

Konstruksjonsstålene er som følger:

- 355EMZ, B = 50mm
- 450EMZ, B = 50mm
- StE690, B = 40mm

CTOD kurven for de ulike konstruksjonsstålene ser slik ut:



Figur 67: CTOD verdier for tre ulike konstruksjonsstål plottet mot temperatur [S.12].

Tabell 40: Materialbetingelsene [S.2].

Ståltype	Temperatur (°C)	Tykkelse (mm)	Flytegrense (MPa)
355EMZ	25	50	366
450EMZ	25	50	490
StE690	25	40	735

11.4.2. Antagelser:

Jeg antar at:

- $\nu = 0,3$ for konstruksjonsstål.
- $E = 210\ 000\text{MPa}$ for konstruksjonsstål.

11.4.3. Del 1: Lese av data

Har lest av grafen i figur 67 for ulike verdier CTOD. Tar forbehold om visse avlesningsfeil. Alle de avleste verdiene for CTOD kan ses i tabell 41.

Tabell 41: Avleste CTOD verdier fra figur 67 ved ulike temperaturer.

Temperatur (°C)	CTOD (mm)		
	355EMZ (mm)	450EMZ (mm)	StE690 (mm)
-150	0,09	-	-
-145	0,093	-	-
-140	0,095	0,01	-
-135	0,097	0,09	-
-130	0,098	0,12	-
-125	0,1	0,18	-
-120	0,12	0,21	-
-115	0,14	0,25	-
-110	0,15	0,31	-
-105	0,18	0,38	-
-100	0,2	0,48	-
-95	0,25	0,68	-
-90	0,3	0,75	-
-85	0,35	0,92	-
-80	0,38	1,08	-
-75	0,42	1,2	-
-70	0,5	1,33	-
-65	0,6	1,38	0,04
-60	0,62	1,42	0,05
-55	0,7	1,45	0,07
-50	0,8	1,48	0,08
-45	0,9	1,49	0,1
-40	1	1,5	0,11
-35	1,2	1,51	0,14
-30	1,42	1,52	0,18
-25	1,52	1,53	0,22
-20	1,62	1,54	0,235
-15	1,65	1,55	0,242
-10	1,68	-	0,25
-5	1,72	-	0,26
0	1,75	-	0,27

5	1,76	-	0,28
10	-	-	0,29
15	-	-	0,3
20	-	-	0,32

11.4.4. Del 2: Estimere bruddseigheten K_{mat} for de tre konstruksjonsstålene

Formelen for å konvertere til K_{mat} fra CTOD (δ) er som følger:

$$K_{mat} = \left[\frac{\lambda \sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

Der:

σ_y = Flytegrensen (MPa).

δ_{mat} = Estimert CTOD verdi (m).

ν = Poissons tall.

Jeg ønsker at den estimerte bruddseigheten skal ha benevnningen $\text{MPa}\sqrt{m}$, og må derfor huske på å konvertere CTOD verdiene fra millimeter til meter før jeg benytter dem i formelen.

355EMZ, B = 50mm:

Jeg viser beregningene for den første verdien for alle de tre konstruksjonsstålene. Beregningene for resten av verdiene har jeg gjennomført ved bruk av regneark i Excel og kan ses i tabell 42.

Formelen jeg bruker er som følger:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

Der:

$\sigma_y = 366 \text{MPa}$

$\delta_{mat} = 0,09 \text{mm} = 0,00009 \text{m}$

$\nu = \text{Antar } 0,3$

$E = \text{Antar } 210\,000 \text{MPa}$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \cdot 366 \cdot 0,00009 \cdot 210000}{(1 - 0,3^2)} \right]^{0,5}$$

$$K_{mat} = 106,78 \text{MPa}\sqrt{m}$$

**450EMZ, B = 50mm:**

Formelen jeg bruker er som følger:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

Der:

$$\sigma_y = 490\text{MPa}$$

$$\delta_{mat} = 0,01\text{mm} = 0,00001\text{m}$$

$$\nu = \text{Antar } 0,3$$

$$E = \text{Antar } 210\,000\text{MPa}$$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \cdot 490 \cdot 0,00001 \cdot 210000}{(1 - 0,3^2)} \right]^{0,5}$$

$$\mathbf{K_{mat} = 41,18\text{MPa}\sqrt{m}}$$

StE690, B = 40mm:

Formelen jeg bruker er som følger:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

Der:

$$\sigma_y = 735\text{MPa}$$

$$\delta_{mat} = 0,04\text{mm} = 0,00004\text{m}$$

$$\nu = \text{Antar } 0,3$$

$$E = \text{Antar } 210\,000\text{MPa}$$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \cdot 735 \cdot 0,00004 \cdot 210000}{(1 - 0,3^2)} \right]^{0,5}$$

$$\mathbf{K_{mat} = 100,88\text{MPa}\sqrt{m}}$$

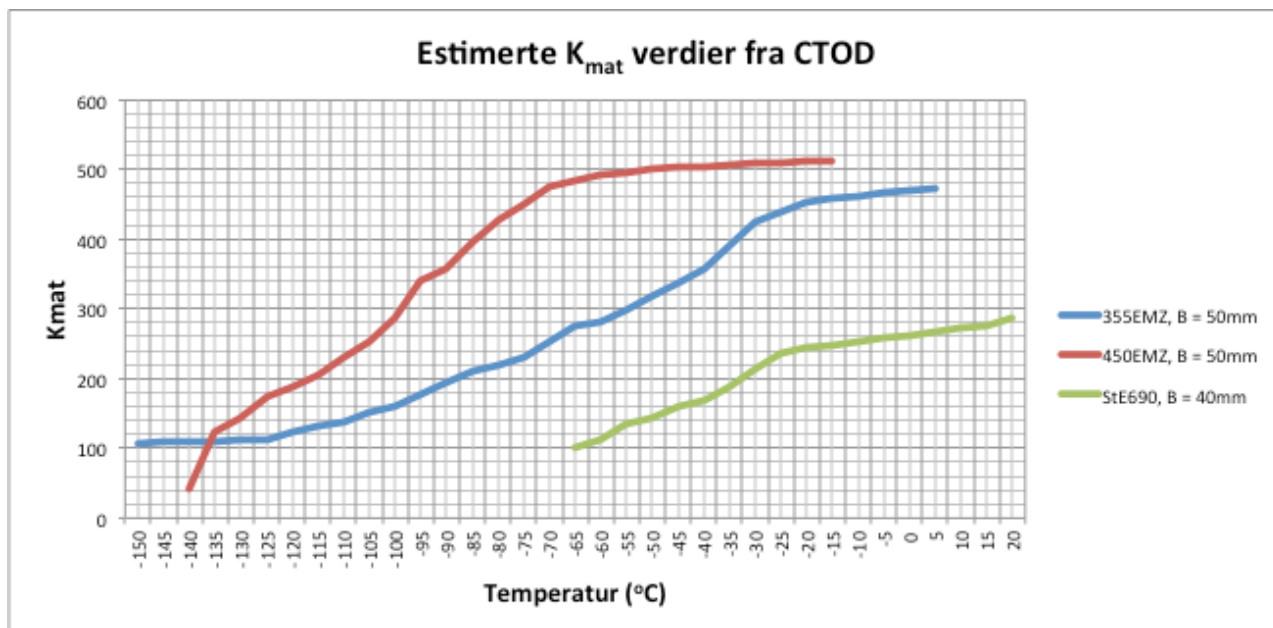
11.4.5. Del 3: Resterende utregninger og sammenligning

Alle de konverterte CTOD verdiene er listet opp i tabell 42. CTOD verdiene har blitt konvertert til en estimert verdi K_{mat} ved bruk av hensiktsmessige korrelasjonsformler.

Tabell 42: Alle K_{mat} verdiene for de tre ulike konstruksjonsstålene. Her har jeg benyttet meg av regneark i Excel.

Temperatur (°C)	355EMZ B = 50mm K_{mat} (MPa√m)	450EMZ B = 50mm K_{mat} (MPa√m)	StE690 B = 40mm K_{mat} (MPa√m)
-150	106,78	-	-
-145	108,55	-	-
-140	109,71	41,18	-
-135	110,86	123,55	-
-130	111,43	142,67	-
-125	112,56	174,73	-
-120	123,30	188,73	-
-115	133,18	205,92	-
-100	137,85	229,30	-
-105	151,01	253,88	-
-100	159,18	285,33	-
-95	177,97	339,62	-
-90	194,96	356,67	-
-85	210,58	395,03	-
-80	219,42	428,00	-
-75	230,67	451,15	-
-70	251,69	474,96	-
-65	275,71	483,81	100,88
-60	280,27	490,77	112,79
-55	297,80	495,93	133,45
-50	318,36	501,03	142,67
-45	337,67	502,72	159,51
-40	355,94	504,40	167,29
-35	389,91	506,08	188,73
-30	424,15	507,76	214
-25	438,83	509,42	236,59
-20	453,04	511,08	244,52
-15	457,21	512,74	248,13
-10	461,35	-	252,20
-5	466,81	-	257,20
0	470,86	-	262,10
5	472,21	-	266,91
10	-	-	271,63
15	-	-	276,27
20	-	-	285,33

Verdiene i tabell 42 viser de konverterte CTOD verdiene i form av K_{mat} . Disse har blitt plottet i figur 68, som viser K_{mat} versus temperatur.



Figur 68: De konverterte K_{mat} verdiene plottet mot temperatur.

11.5. Case 4: Anvendelse av korrelasjonsmetoder på A36 stål

11.5.1. Bakgrunn

Målet med denne casen er å vise bruken av korrelasjonsformlene på alle områdene; nedre grense område, omslagsområde og for det øvre grense område. Jeg har valgt å bruke A36 stål, et stål som anses som et helt vanlig og anvendelig konstruksjonsstål.

A36 stål er standardisert etter den amerikanske standarden ASTM, og i figur 69 kan man se slagseighetskurven for stålet. Denne kurven er utgangspunktet for slagseighetsverdiene i denne casen. Casen representerer bruk av formelverket innenfor alle de tre områdene på omslagskurven og gir en veldig grei og enkel innføring i bruk av korrelasjonsmetodene.

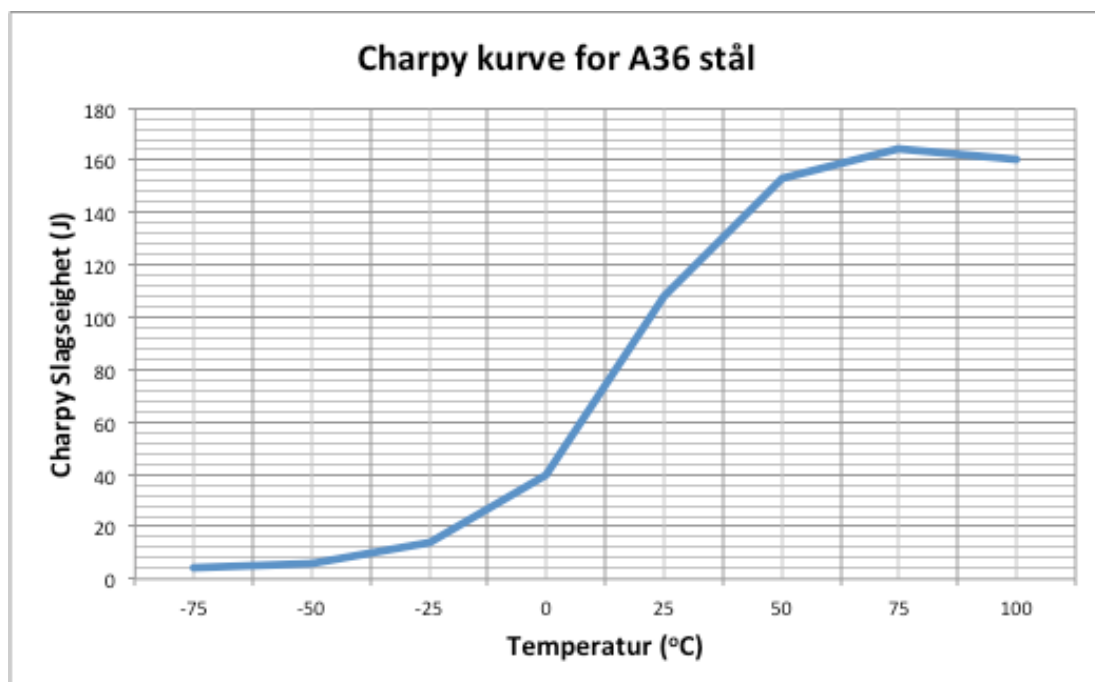
Som forklart tidligere i oppgaven under kapitlet ”Ulike typer Charpy data” er den beste formen for slagseighetsverdier en kan ha, en fullstendig Charpy omslagskurve. Da er man i stand til å kunne se de ulike omslagsområdene tydelig og det forenkler bruken av korrelasjonsformlene.

11.5.2. Antagelser

- Antar 25mm plater.
- Her er det bare avlest slagseighets verdier fra en Charpy kurve, og tar derfor forbehold om en viss unøyaktighet og eventuelle avlesningsfeil.

11.5.3. Del 1: Estimerte K_{mat} verdier fra slagseigheter

Kurven under viser omslagskurven, slagseighet versus temperatur for konstruksjonsstålet A36. Ved å lese av slagseighetsverdier ved ulike temperaturer har jeg brukt de ulike korrelasjonsmetodene for å estimere bruddseigheten, K_{mat} verdiene.



Figur 69: Omslagskurve for A36 stål [13].

Jeg bruker temperaturer som strekker seg fra -75°C til 100°C . Deretter har jeg lest av de ulike slagseighetsverdiene fra figur 69. Verdiene for temperatur og avlest Charpy slagseighet kan ses i tabell 43.

Tabell 43: Avlest temperatur versus Charpy slagseighet.

Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Charpy energi (Joules)
-75	4
-50	6
-25	14
0	40
25	108
50	153
75	164
100	160

Nedre grense området:

Ettersom vi befinner oss innenfor det nedre grense område på slagseighetskurven må vi anvende formelverket for den nedre grensen, den nedre korrelasjonsmetoden:

$$K_{mat,25} = 12\sqrt{C_v}$$

Ved $T = -75^{\circ}\text{C}$:

$$\begin{aligned} K_{mat,25} &= 12\sqrt{C_v} \\ K_{mat,25} &= 12\sqrt{4} \\ \mathbf{K_{mat,25} &= 24 \text{ MPa}\sqrt{m}} \end{aligned}$$

Ved $T = -50^{\circ}\text{C}$:

$$\begin{aligned} K_{mat,25} &= 12\sqrt{C_v} \\ K_{mat,25} &= 12\sqrt{6} \\ \mathbf{K_{mat,25} &= 29 \text{ MPa}\sqrt{m}} \end{aligned}$$

Ved $T = -25^{\circ}\text{C}$:

$$\begin{aligned} K_{mat,25} &= 12\sqrt{C_v} \\ K_{mat,25} &= 12\sqrt{14} \\ \mathbf{K_{mat,25} &= 45 \text{ MPa}\sqrt{m}} \end{aligned}$$

Omslagsområdet:

Her må vi bruke formelen for omslagsområdet, som er som følger:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{0,019(T-T_{27/28J}+18^{\circ}\text{C})}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4}$$

Omslagstemperaturen som er ved $C_v = 27/28\text{J}$ er ca. $T = -10^{\circ}\text{C}$. Velger å bruke kumulativ bruddsannsynlighet $P_f = 5\%$ slik som anbefalt i den Britiske Standarden BS 7910 [S.6].

$$T - T_{28J} + 18^{\circ}\text{C} = T + 10 + 18 = T + 28$$

$$P_f = 0,05$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{0,019(T+28)} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4}$$

Ved $T = 0^{\circ}\text{C}$:

$$K_{mat} = 31 + 77e^{0,019(T+28)} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{0,019(0+28)} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = \mathbf{93 \text{ MPa}\sqrt{m}}$$

Ved $T = 25^{\circ}\text{C}$:

$$K_{mat} = 31 + 77e^{0,019(T+28)} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = 31 + 77e^{0,019(25+28)} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-0,05}\right)\right\}^{1/4}$$

$$K_{mat} = \mathbf{131 \text{ MPa}\sqrt{m}}$$

Øvre grense området:

Nå er vi i det øvre grense området, og må følgelig bruke formelen:

$$K_{mat} = 0,54C_v + 55$$

Ved $T = 50^{\circ}\text{C}$:

$$K_{mat} = 0,54C_v + 55$$

$$K_{mat} = 0,54(153) + 55$$

$$K_{mat} = \mathbf{138 \text{ MPa}\sqrt{m}}$$

Ved T = 75°C:

$$K_{mat} = 0,54C_v + 55$$

$$K_{mat} = 0,54(164) + 55$$

$$K_{mat} = 144 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Ved T = 100°C:

$$K_{mat} = 0,54C_v + 55$$

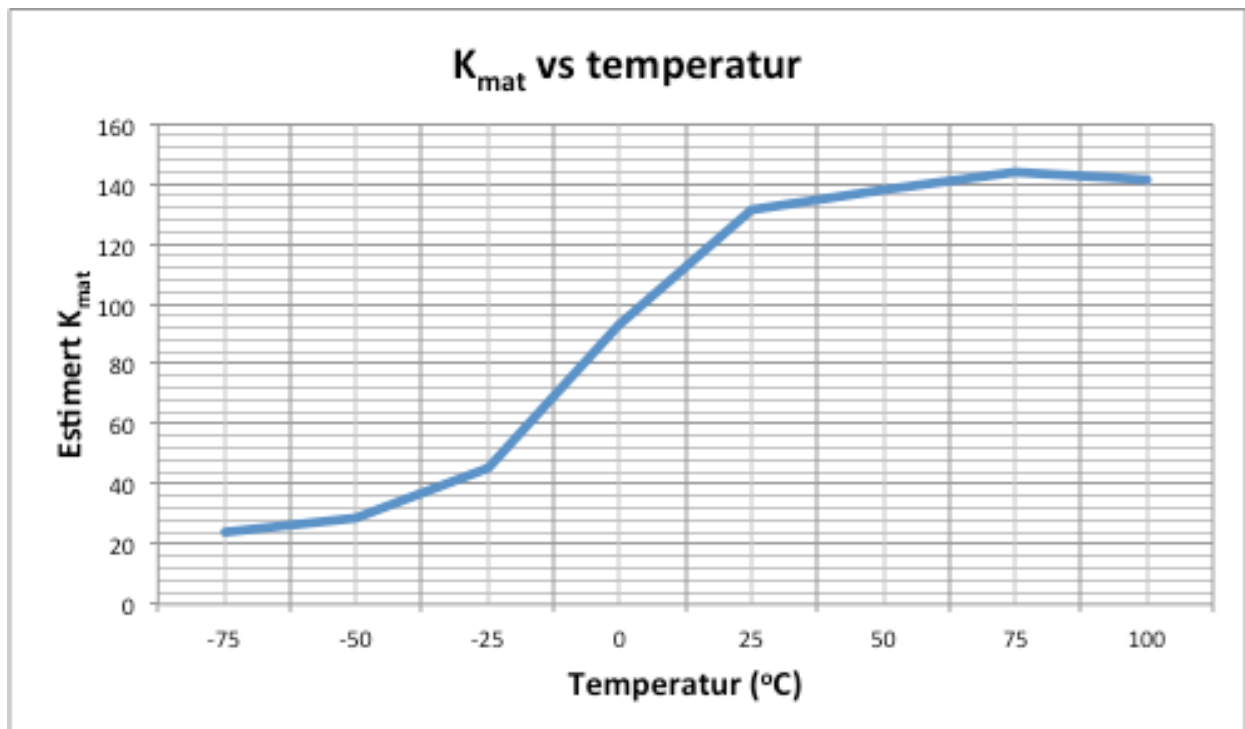
$$K_{mat} = 0,54(160) + 55$$

$$K_{mat} = 141 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Tabell 44: Viser K_{mat} verdiene for hele temperatur spennet for alle de tre områdene.

Temperatur	T	-75	-50	-25	0	25	50	75	100
Charpy	J	4	6	14	40	108	153	164	160
$K_{mat,25}$	$\text{MPa}\sqrt{m}$	24	29	45	-	-	-	-	-
$K_{mat, omslagsområdet}$	$\text{MPa}\sqrt{m}$	-	-	-	93	131	-	-	-
$K_{mat, \text{ øvre grense området}}$	$\text{MPa}\sqrt{m}$	-	-	-	-	-	138	144	141

De tilhørende verdiene fra tabell 44 er plottet i figur 70.



Figur 70: Den estimerte K_{mat} verdien plottet mot temperaturen.

11.5.4 Del 2: CTOD og plan spenning

Estimat av hvilken CTOD verdi (δ_C) man får når man antar at det er plan spenning ved romtemperatur:

For vanlig konstruksjonsstål ligger CTOD mellom 0,2 – 0,3mm ifølge NORSOK standarden [S.19].

Setter $K_{mat,25^\circ C} = K_C$

$$K_C = 131\text{MPa}\sqrt{m}$$

$$E = 210000\text{MPa}$$

$$R_e = 303\text{MPa [S.5]}$$

CTOD ved plan spenning:

$$\delta_C = \frac{K_C^2}{E \cdot R_e}$$

$$\delta_C = \frac{K_C^2}{E \cdot R_e} = \frac{131^2}{210000 \cdot 303}$$

$$\delta_C = 0,27\text{mm}$$

$\delta_C = 0,27\text{mm}$ stemmer meget bra og anses som et bra estimat, ettersom CTOD vanligvis ligger på mellom 0,2 og 0,3mm for konstruksjonsstål [S.19].

11.5.5 Del 3: Tykkelse versus bruddseighet

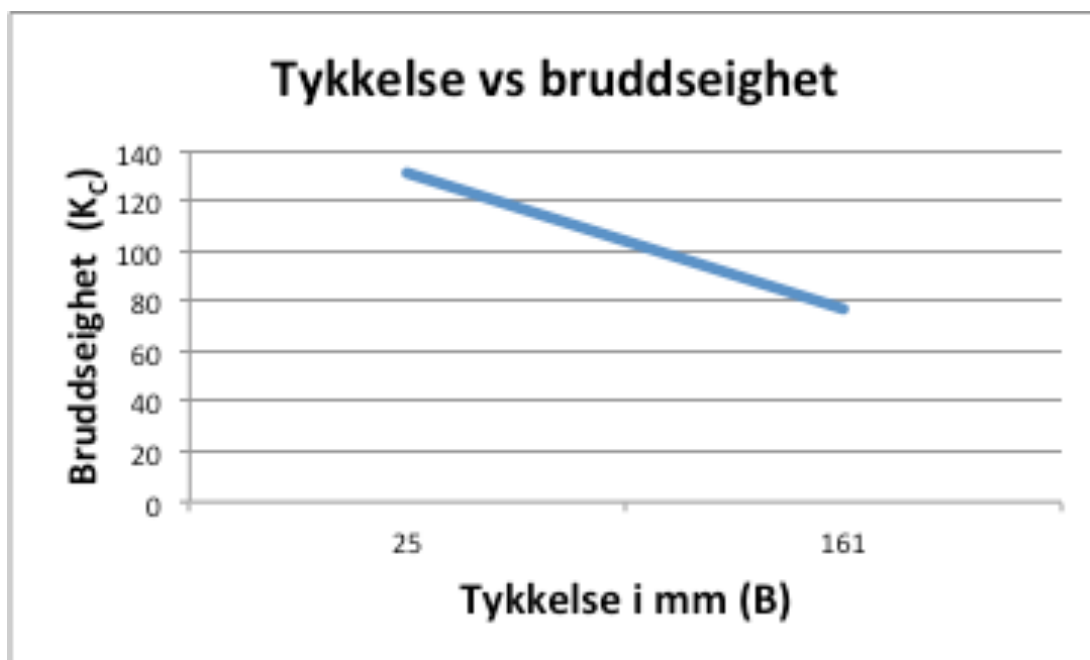
Her vil jeg se på tykkelse versus bruddseighet, finne K_{IC} verdi ved 25°C, og hvilken platetykkelse som kreves for at den skal være gyldig. Etter det vil jeg skissere tykkelse versus bruddseighet i et diagram, som kan ses i figur 71.

K_{IC} verdi ved 25°C og hvilken platetykkelse som kreves for at den skal være gyldig:

For A36 stål så er $K_{IC} = 76,9\text{MPa}\sqrt{m}$ ved $T = 25^\circ\text{C}$ og har en flytegrense på $\sigma_y = 303\text{MPa [S.5]}$.

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{R_e}\right)^2$$

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{76,9}{303}\right)^2 = 161\text{mm}$$



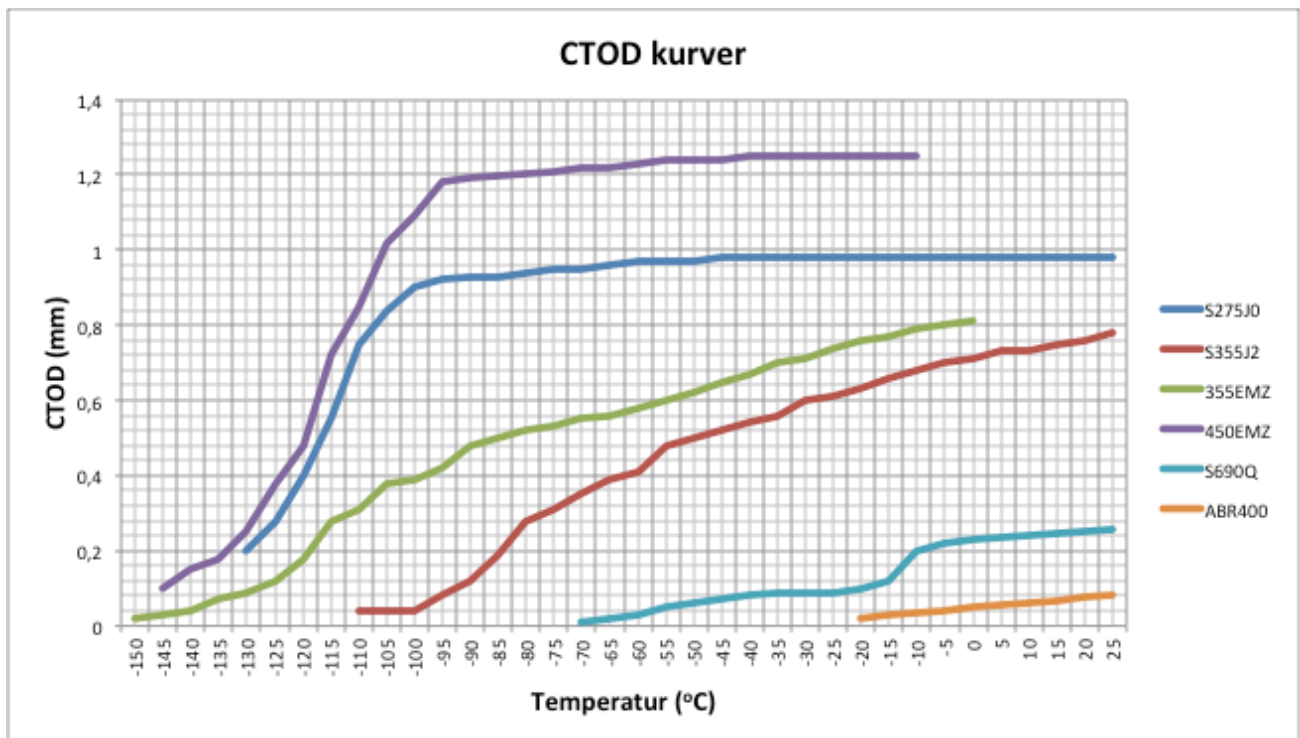
Figur 71: Graf som viser tykkelse versus bruddseighet.

11.6. Case 5: Konvertere CTOD verdier til K_{mat}

11.6.1. Bakgrunn:

I denne casen har jeg som mål å estimere bruddseigheten for seks ulike konstruksjonsstål og sammenligne disse. Alle de seks konstruksjonsstålene har en tykkelse på 25mm. Jeg viser hvordan man bruker formelverket og hvordan jeg går frem for å konvertere CTOD verdier til et estimat av K_{mat} . De seks ulike konstruksjonsstålene er som følger:

- S275J0
- S355J2
- 355EMZ
- 450EMZ
- S690Q
- ABR400



Figur 72: CTOD-verdiene for de ulike konstruksjonsstålene plottet mot temperatur [S.12].

Figur 72 representerer alle CTOD verdiene versus temperatur for de ulike konstruksjonsstålene. I tabell 45 under har jeg lest av de aktuelle verdiene som jeg ønsker å benytte for å estimere bruddseigheten i form av K_{mat} . Disse er som følger:

Tabell 45: Avleste CTOD-verdier for de ulike konstruksjonsstålene.

Temperatur (°C)	CTOD (mm)					
	S275J0 (mm)	S355J2 (mm)	355EMZ (mm)	450EMZ (mm)	S690Q (mm)	ABR400 (mm)
-150	-	-	0,02		-	-
-145	-	-	0,03	0,1	-	-
-140	-	-	0,04	0,15	-	-
-135	-	-	0,07	0,18	-	-
-130	0,2	-	0,09	0,25	-	-
-125	0,28	-	0,12	0,38	-	-
-120	0,4	-	0,18	0,48	-	-
-115	0,55	-	0,28	0,72	-	-
-110	0,75	0,04	0,31	0,85	-	-
-105	0,84	0,04	0,38	1,02	-	-
-100	0,9	0,04	0,39	1,09	-	-
-95	0,92	0,08	0,42	1,18	-	-
-90	0,93	0,12	0,48	1,19	-	-
-85	0,93	0,19	0,5	1,195	-	-
-80	0,94	0,28	0,52	1,2	-	-
-75	0,95	0,31	0,53	1,21	-	-
-70	0,95	0,35	0,55	1,22	0,01	-
-65	0,96	0,39	0,56	1,22	0,02	-
-60	0,97	0,41	0,58	1,23	0,03	-
-55	0,97	0,48	0,6	1,24	0,05	-
-50	0,97	0,5	0,62	1,24	0,06	-
-45	0,98	0,52	0,65	1,24	0,07	-
-40	0,98	0,54	0,67	1,25	0,08	-
-35	0,98	0,56	0,7	1,25	0,085	-
-30	0,98	0,6	0,71	1,25	0,085	-
-25	0,98	0,61	0,74	1,25	0,09	-
-20	0,98	0,63	0,76	1,25	0,1	0,02
-15	0,98	0,66	0,77	1,25	0,12	0,028
-10	0,98	0,68	0,79	1,25	0,2	0,034
-5	0,98	0,7	0,8	1,25	0,22	0,041
0	0,98	0,71	0,81	1,25	0,23	0,048
5	0,98	0,73	-	1,25	0,235	0,055
10	0,98	0,73	-	1,25	0,24	0,062
15	0,98	0,75	-	1,25	0,245	0,069
20	0,98	0,76	-	1,25	0,25	0,076
25	0,98	0,78	-	1,25	0,255	0,08

Jeg antar at alle prøvene er gjort ved romtemperatur, $T = 25^{\circ}\text{C}$. Tykkelsen på prøvene er 25mm, og følgende flytegrenser er vist i tabell 46.

Tabell 46: Temperatur, tykkelse og flytegrense til de ulike konstruksjonsstålene [S.12].

Ståltype	Temperatur (°C)	Tykkelse (mm)	Flytegrense (MPa)
S275J0	25	25	303
S355J2	25	25	397
355EMZ	25	25	436
450EMZ	25	25	471
S690Q	25	25	713
ABR400	25	25	991

11.6.2. Antagelser:

- E-modul = 210 000MPa for konstruksjonsstål.
- $\nu = 0,3$ for konstruksjonsstål.

Bruker følgende formel for å estimere bruddseigheten K_{mat} :

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

Jeg viser utregningen for den første estimerte bruddseighetsverdien konvertert fra CTOD for hvert materiale. Deretter har jeg gjennomført alle utregningene med regneark i Excel. Det er viktig å huske på at for å få benevnning i $MPa\sqrt{m}$ må en huske på å konvertere CTOD verdiene fra millimeter til meter.

11.6.3. Utregninger:

S275J0:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \cdot 303 \cdot 0,0002 \cdot 210000}{(1 - 0,3^2)} \right]^{0,5}$$

$$K_{mat} = 144,83 MPa\sqrt{m}$$

S355J2:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \cdot 397 \cdot 0,00004 \cdot 210000}{(1 - 0,3^2)} \right]^{0,5}$$

$$K_{mat} = 74,14 MPa\sqrt{m}$$

355EMZ:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \cdot 436 \cdot 0,00002 \cdot 210000}{(1 - 0,3^2)} \right]^{0,5}$$

$$\mathbf{K_{mat} = 54,94MPa\sqrt{m}}$$

450EMZ:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \cdot 471 \cdot 0,0001 \cdot 210000}{(1 - 0,3^2)} \right]^{0,5}$$

$$\mathbf{K_{mat} = 127,69MPa\sqrt{m}}$$

S690Q:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \cdot 713 \cdot 0,00001 \cdot 210000}{(1 - 0,3^2)} \right]^{0,5}$$

$$\mathbf{K_{mat} = 49,68MPa\sqrt{m}}$$

ABR400:

$$K_{mat} = \left[\frac{1,5\sigma_y \delta_{mat} E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5}$$

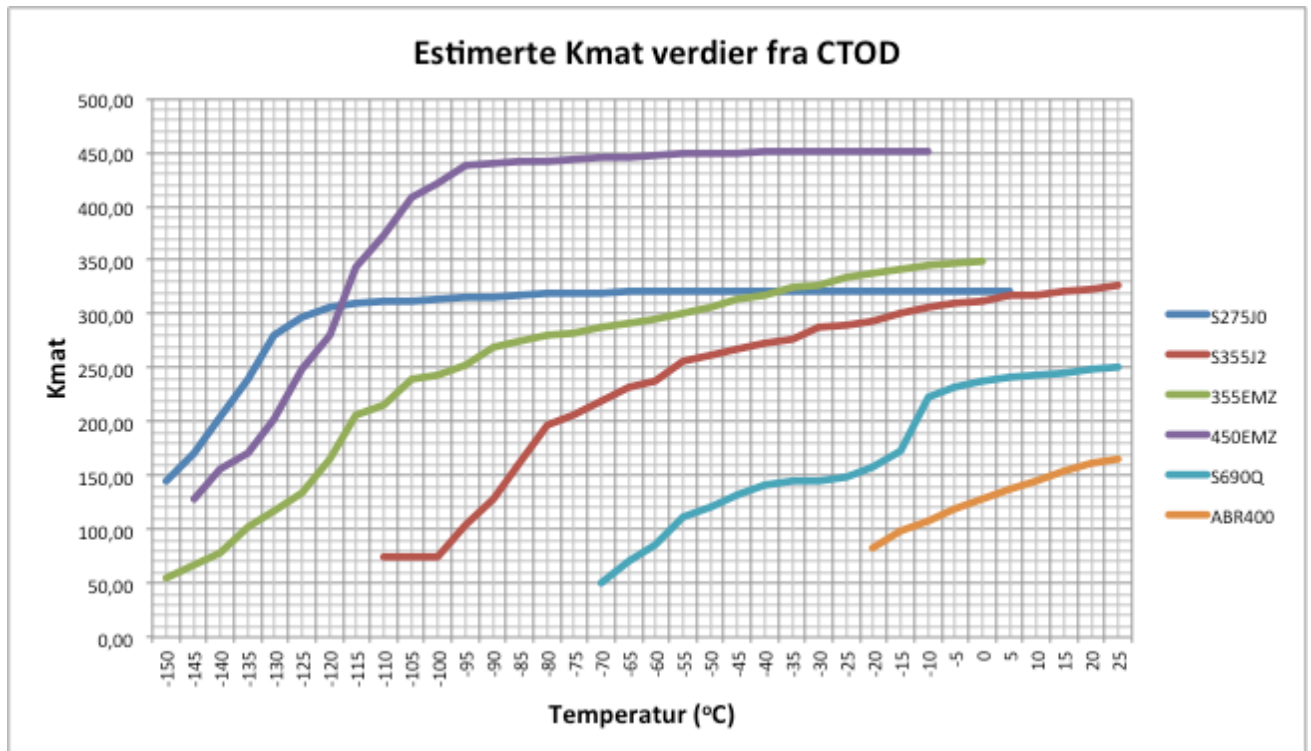
$$K_{mat} = \left[\frac{1,5 \cdot 991 \cdot 0,00002 \cdot 210000}{(1 - 0,3^2)} \right]^{0,5}$$

$$\mathbf{K_{mat} = 82,83MPa\sqrt{m}}$$

Resterende utregninger:

Tabell 47: Estimer av bruddseigheten K_{mat} for de ulike konstruksjonsstålene. Utregningene ble gjennomført ved bruk av regneark i Excel.

Temperatur (°C)	K_{mat} (MPa \sqrt{m})					
	S275J0 (MPa \sqrt{m})	S355J2 (MPa \sqrt{m})	355EMZ (MPa \sqrt{m})	450EMZ (MPa \sqrt{m})	S690Q (MPa \sqrt{m})	ABR400 (MPa \sqrt{m})
-150	-	-	54,94	-	-	-
-145	-	-	67,29	127,69	-	-
-140	-	-	77,70	156,38	-	-
-135	-	-	102,78	171,31	-	-
-130	144,83	-	116,55	201,89	-	-
-125	171,37	-	134,58	248,91	-	-
-120	204,83	-	164,82	279,75	-	-
-115	240,18	-	205,57	342,27	-	-
-110	280,47	74,14	216,30	407,80	-	-
-105	296,82	74,14	239,48	421,56	-	-
-100	307,24	74,14	242,61	438,62	-	-
-95	310,63	104,85	251,77	440,47	-	-
-90	312,32	128,42	269,15	441,40	-	-
-85	312,32	161,59	274,70	442,32	-	-
-80	313,99	196,16	280,14	444,16	-	-
-75	315,66	206,40	282,82	445,99	-	-
-70	315,66	219,31	288,11	445,99	49,68	-
-65	317,32	231,51	290,72	447,81	70,26	-
-60	318,96	237,37	295,86	449,63	86,05	-
-55	318,96	256,83	300,92	449,63	111,09	-
-50	318,96	262,13	305,90	449,63	121,69	-
-45	320,60	267,32	313,21	451,44	131,44	-
-40	320,60	272,41	317,99	451,44	140,52	-
-35	320,60	277,41	325,03	451,44	144,84	-
-30	320,60	287,15	327,35	451,44	144,84	-
-25	320,60	289,53	334,19	451,44	149,04	-
-20	320,60	294,24	338,68	451,44	157,10	82,83
-15	320,60	301,16	340,90	451,44	172,10	98,01
-10	320,60	305,69	345,30	451,44	222,17	108
-5	320,60	310,16	347,47	-	233,02	118,59
0	320,60	312,36	349,64	-	238,26	128,32
5	320,60	316,73	-	-	240,83	137,36
10	320,60	316,73	-	-	243,38	145,84
15	320,60	321,04	-	-	245,90	153,85
20	320,60	323,17	-	-	248,40	161,46
25	320,60	327,40	-	-	250,87	165,66



Figur 73: Den estimerte bruddseigheten K_{mat} for alle konstruksjonsstålene plottet mot temperatur.

11.7. Case 6: Når man bare har én verdi

11.7.1. Bakgrunn:

Bakgrunnen for denne casen er dersom man i en reell problemstilling kun har én verdi å jobbe med og ikke en hel omslagskurve. For eksempel er man ingeniør og har tilgang til omslagstemperaturer for noen ulike konstruksjonsstål. Kan man da tilegne seg et estimat av bruddseigheten kun fra disse verdiene. Dette går tilbake til det som er forklart tidligere i rapporten, der man ofte kun har én slagseighetsverdi gitt ved én temperatur. Først estimerer vi bruddseigheten, deretter CTOD ved plan spenning.

11.7.2. Del 1: Estimere bruddseigheten

Ved å se på følgende konstruksjonsstål:

- S235JR
- S235J0
- S235J2

Tabell 48: Ifølge Eurokode 3 - del 1-10, er omslagstemperaturene følgende [S.22].

Stålsort	Stålgruppe	Temperatur ved omslagsområde (°C)	Slagseighet (J)
S235	JR	20	27/28
	J0	0	27/28
	J2	-20	27/28

Bruker følgende formel for omslagsområde:

$$K_{mat} = 20 + [11 + 77e^{\{0,019(T-T_{27/28J}+18^{\circ}\text{C})\}}] \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4} \left\{\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\right\}^{1/4}$$

Antagelser:

- Antar at $T = 20^{\circ}\text{C}$.
- Bruker anbefalingen fra BS 7910 om kumulativ bruddsannsynlighet $P_f = 5\%$.
- Antar tykkelse $B = 25\text{mm}$.

$T - T_{27/28J} + 18^{\circ}\text{C}$ blir som følger for de tre ulike konstruksjonsstålene:

1. **S235JR:** $T_{27/28J} = 20^{\circ}\text{C}$
 $T - T_{27/28J} + 18^{\circ}\text{C} = (20 - 20 + 18) = 18^{\circ}\text{C}$
2. **S235J0:** $T_{27/28J} = 0^{\circ}\text{C}$
 $T - T_{27/28J} + 18^{\circ}\text{C} = (20 - 0 + 18) = 33^{\circ}\text{C}$
3. **S235J2:** $T_{27/28J} = -20^{\circ}\text{C}$
 $T - T_{27/28J} + 18^{\circ}\text{C} = (20 + 20 + 18) = 58^{\circ}\text{C}$

Estimat av bruddseigheten:

1. $K_{mat} = 31 + 77e^{(0,019 \cdot 18)} \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-0,05} \right) \right\}^{1/4}$
 $K_{mat} = 82,6 \text{MPa}\sqrt{m}$
2. $K_{mat} = 31 + 77e^{(0,019 \cdot 33)} \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-0,05} \right) \right\}^{1/4}$
 $K_{mat} = 99,6 \text{MPa}\sqrt{m}$
3. $K_{mat} = 31 + 77e^{(0,019 \cdot 58)} \left(\frac{25}{25}\right)^{1/4} \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-0,05} \right) \right\}^{1/4}$
 $K_{mat} = 161 \text{MPa}\sqrt{m}$

Tabell 49: Viser den estimerte bruddseigheten.

Stålsort	Stålgruppe	Temperatur ved omslagsområde (°C)	Slagseighet ved omslagsområde (J)	Estimert bruddseighet (MPa√m)
S235	JR	20	27/28	82,6MPa√m
	J0	0	27/28	99,6MPa√m
	J2	-20	27/28	161MPa√m

11.7.3. Del 2: CTOD ved plan spenning

Dersom $K_{mat} = K_C$:

$$\delta_C = \frac{K_C^2}{E \cdot R_e}$$

Antar:

- $E = 210000 \text{MPa}$
- $R_e = 235 \text{MPa}$

1. $\delta_C = \frac{K_C^2}{E \cdot R_e} = \frac{82,6^2}{210000 \cdot 235}$
 $\delta_C = 0,14 \text{mm}$
2. $\delta_C = \frac{K_C^2}{E \cdot R_e} = \frac{99,6^2}{210000 \cdot 235}$
 $\delta_C = 0,2 \text{mm}$
3. $\delta_C = \frac{K_C^2}{E \cdot R_e} = \frac{161^2}{210000 \cdot 235}$
 $\delta_C = 0,52 \text{mm}$

Tabell 50: Viser den estimerte bruddseigheten og CTOD ved plan spenning.

Stålsort	Stålgruppe	Estimert bruddseighet (MPa√m)	CTOD ved plan spenning (mm)
S235	JR	82,6	0,14
	J0	99,6	0,2
	J2	161	0,52

11.8. Praktisk testing på lab

11.8.1. Bakgrunn

Ettersom de andre casene bygger på slagseighetsverdier jeg har funnet fra tidligere gjennomførte slagseighetstester ønsker jeg i denne omgang å finne mine egne verdier. Ved å gjennomføre en Charpy slagseighetstest på et material laboratorium ved Universitetet kan jeg gjøre nettopp dette. Ved å hente slagseighetsverdiene selv vet jeg under hvilke forutsetninger testene har blitt gjennomført og under hvilke forhold. I tillegg til dette får jeg anledningen til å gjøre noe praktisk gjennom mastergradsarbeidet.

Konstruksjonsstålet som ble bestilt opp heter S235JRC. På verkstedet ved Universitetet med verkstedsjef Bjørn Brenna i spissen ble det laget ti identiske Charpy prøvestaver i henhold til standarden på 10x10x55mm.

En av ulempene er at Universitetet ikke har fres som gjør sitt til at man får produsert et V-spor på prøvestaven som har nøyaktig radien på 0,25mm. Dermed blir ikke prøvestaven nøyaktig etter standard.

Prøvestavene ble seende slik ut:



Figur 74: Bildet viser prøvestavene brukt under Charpy slagseighetstesting. Disse er laget i henhold til standardiserte Charpy krav med målene 10x10x55mm og med V-spor.

Nærbilde av prøvestaven:



Figur 75: Nærbilde av prøvestaven. Bildet viser tydelig plasseringen av V-sporet.

Radien i den maskinerte kjernen som egentlig skulle være nøyaktig 0,25mm er bare tilnærmet. Jeg synes det er på sin plass å kommentere dette i rapporten.

11.8.2. Måleutstyr

For å kunne måle temperaturen på prøvestaven både før og etter bruddet benyttet jeg meg av et varmekamera. Dette varmekamera har muligheten til å registrere varmeutstrålingen fra legemet. Målet var å se om den energien som skal til for å slå av en prøvestav øker temperaturen i stålet der bruddet har forekommet. Dette er spesielt interessant fordi temperaturen øker på grunn av all energien som oppstår under selve slaget.



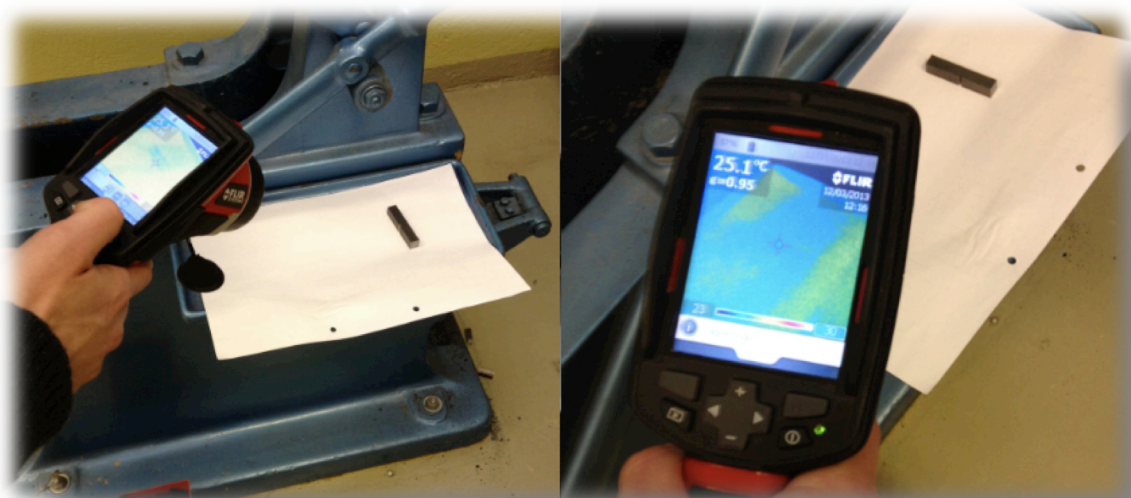
Figur 76: Varmekameraet jeg benyttet meg av heter InfraCAM og blir levert av FLIR Systems.

Varmekameraet fungerer slik at man tar bilde av legeme man vil måle varmeutstrålingen fra ved å sikte inn kamera mot legeme, slik som vist i figur 78. Røde områder anses som varmt og blå områder anses som kaldt. Ved å ta et bilde før og etter bruddet vil jeg kunne se om det har oppstått noen varmeutvikling på grunn av slaget.



Figur 77: Bildet viser hvordan varmekameraet ser ut.

For å kunne få en viss grad av nøyaktighet på bildene fra varmekameraet er man nødt til å stille inn emissiviteten for det materialet man tar bilde av. Emissiviteten måler den energien som kommer fra et legeme i form av elektromagnetisk varmestråling og benevnes med bokstaven "e" [19]. For konstruksjonsstål er dette ca. $e = 0,95$ [14]. Derfor satte jeg emissiviteten på varmekameraet til $e = 0,95$.



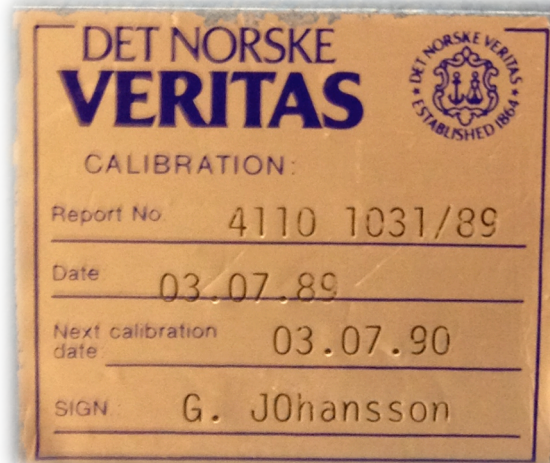
Figur 78: Viser hvordan varmekameraet fungerer. Her ligger prøvestaven plassert med riktig avstand fra kamera. Kamera måler varmeutstrålingen fra legeme, og viser her at legeme har en overflatetemperatur på 25,1°C.



Figur 79: Stadfester at romtemperaturen er ved ca. $T = 25^{\circ}\text{C}$.



Figur 80: Charpy pendelslagapparat som ble benyttet under den praktiske testingen. Bildet er tatt ved Universitetets material laboratorium.



Figur 81: Det Norske Veritas foretok sin siste kalibrering 03.07.1990 på Charpy pendelslagsapparatet ved Universitetet.

Denne pendelslagsmaskinen er av en eldre type. Det finnes mer moderne utstyr som er mer presist og med betydelig økt grad av sikkerhet. De nyeste Charpy apparatene har innkassert pendelarm slik at den ikke skal kunne skade noen når pendelen slippes. Det er også digitale målingsskalaer som viser en mer nøyaktig slagenergi.

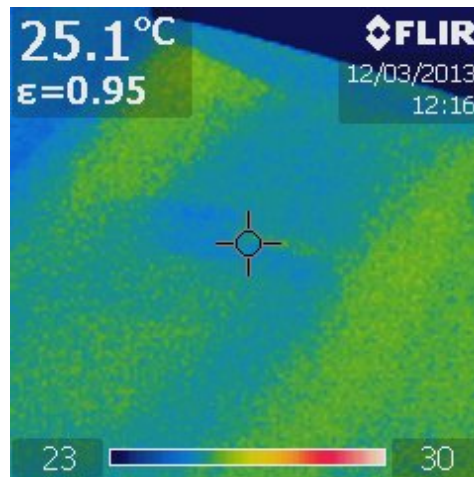
11.8.3. Testresultater

Prøvestavene som var fryst ned ga klart sprøbrudd ettersom de slo rett av og prøvestaven knakk i to eller flere deler. Prøvestavene ved romtemperatur derimot oppførte seg mer seigt og prøvestaven hang ofte sammen selv etter bruddet hadde inntruffet. Resultatene fra den praktiske slagseighetstesting kan ses i tabell 51 og 52.

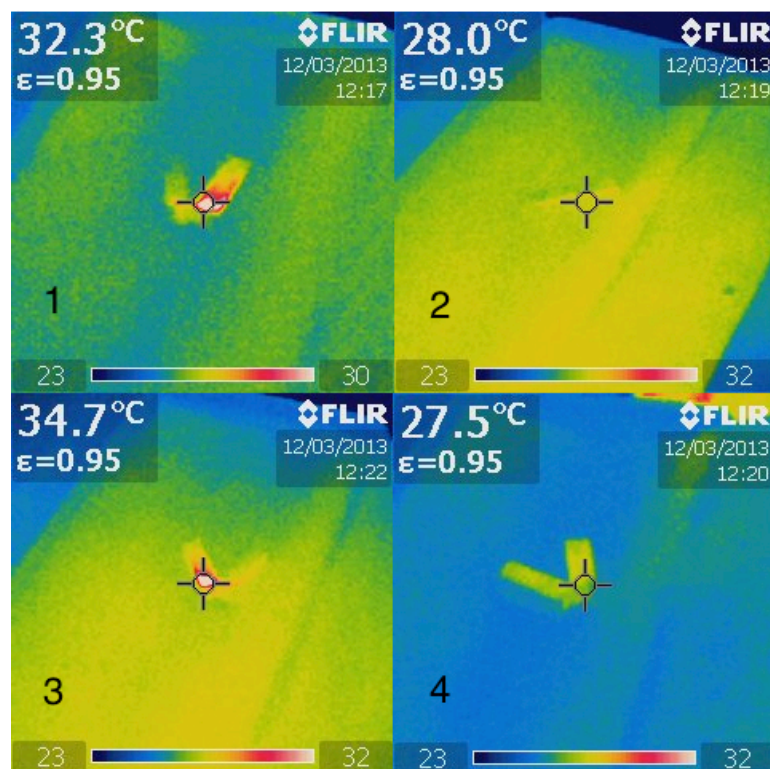
Tabell 51: Testresultatene tatt ved romtemperatur.

Test ved romtemperatur T = 25°C				
Testnummer	Temperatur før (°C)	Temperatur etter (°C)	Vinkel (°)	Slagseighet (J)
1	25	32,3	137	14,7
2	25	28	134	17,6
3	25	34,7	136	15,6
4	25	27,5	135	16,6

Ifølge tabell fra Norsk Stål er slagseigheten for S235JR 27 Joules ved 20°C [S.24]. Dette var det nærmeste jeg kunne finne for S235JRC stål i henhold til oppgitte slagseighetsverdier. Tabellen fra Norsk Stål er gitt under vedlegg B.



Figur 82: Temperaturen til prøvestaven før den har blitt slått av. Bildet viser at prøvestaven har en overflate temperatur på 25,1°C.

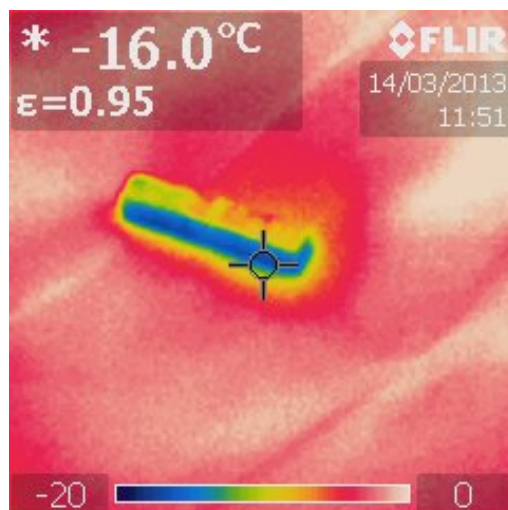


Figur 83: Bildene markert fra 1 til 4 over er tatt med varmekameraet rett etter prøvestaven er slått av. Her ser vi overflatetemperaturen i selve bruddsonen rett etter bruddet har inntruffet.

Bildene i figur 83 er rangert fra 1 til 4 og viser et bilde for hver stav som er slått av. Som vi kan se er det en markant økning i temperatur der hvor bruddet har oppstått. Det røde området på bildet markerer høy varmestråling. Som vi ser av bildene henger prøvestavene fortsatt sammen, noe som indikerer tydelig at dette var seige brudd.

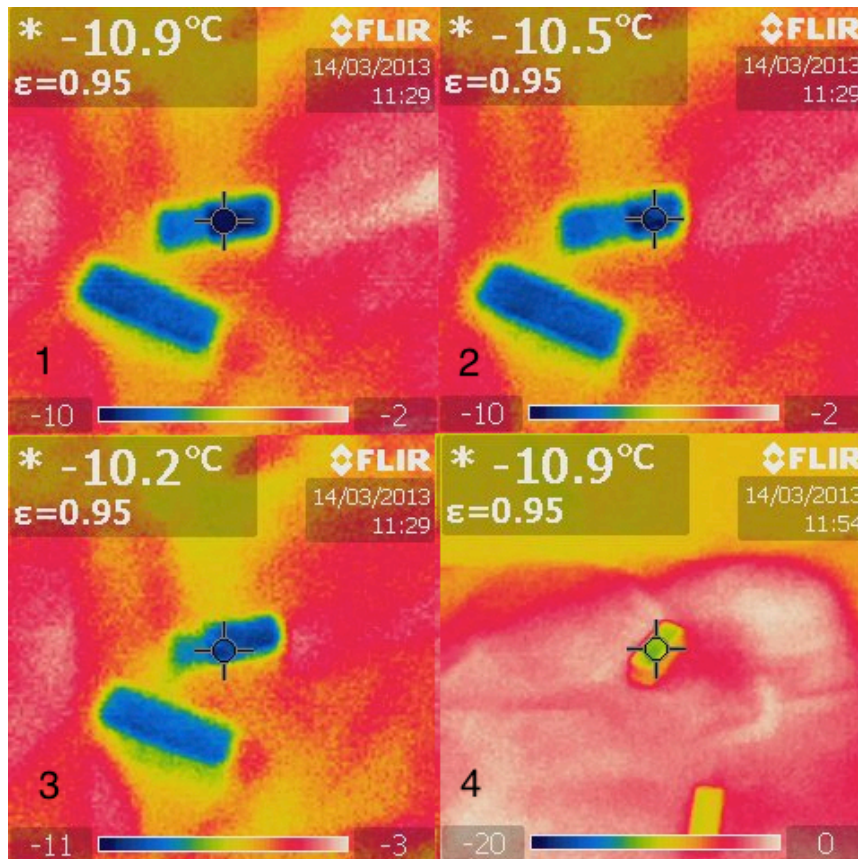
Tabell 52: Testresultatene tatt ved -16°C .

Test ved -16°C				
Testnummer	Temperatur før ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatur etter ($^{\circ}\text{C}$)	Vinkel ($^{\circ}$)	Slagseighet (J)
1	-16	-10,9	149	5
2	-16	-10,5	147	6,4
3	-16	-10,2	149	5
4	-16	-10,9	149	5



Figur 84: Viser at overflatetemperaturen til prøvestaven er ved -16°C . Bildet er tatt før prøvestaven har blitt slått av.

Bildet i figur 84 er tatt med en gang prøvestaven var ute av fryseren for å stadfeste overflatetemperaturen på prøvestaven.



Figur 85: Bilder tatt med varmekamera rett etter at stavene var slått av. Som vi kan se fra bildene har temperaturen økt betraktelig fra -16°C til ca. -10°C på alle de fire prøvene.

Som vi kan se fra bildene i figur 85 slo pendelen staven rett av, gjerne i to eller flere deler. Dette indikerer tydelig at det var sprøbrudd som oppsto. Det var også markant mye lavere energi som skulle til for å slå av stavene når de var kalde fremfor varme.

11.8.4. Kommentarer til forsøkene:

Å få tatt bilder av prøvestavene når de var kalde var en mye større utfordring enn for prøvestavene ved romtemperatur. Årsaken til dette var at pendelmaskinen ikke lot seg flytte siden den var boltet fast til gulvet. Det betydde at man måtte være veldig rask fra man tok prøvestavene ut av fryseren til man fikk slått dem av. I tillegg måtte jeg være veldig rask med å plukke opp igjen den knekte prøvestaven og ta et nytt bilde.

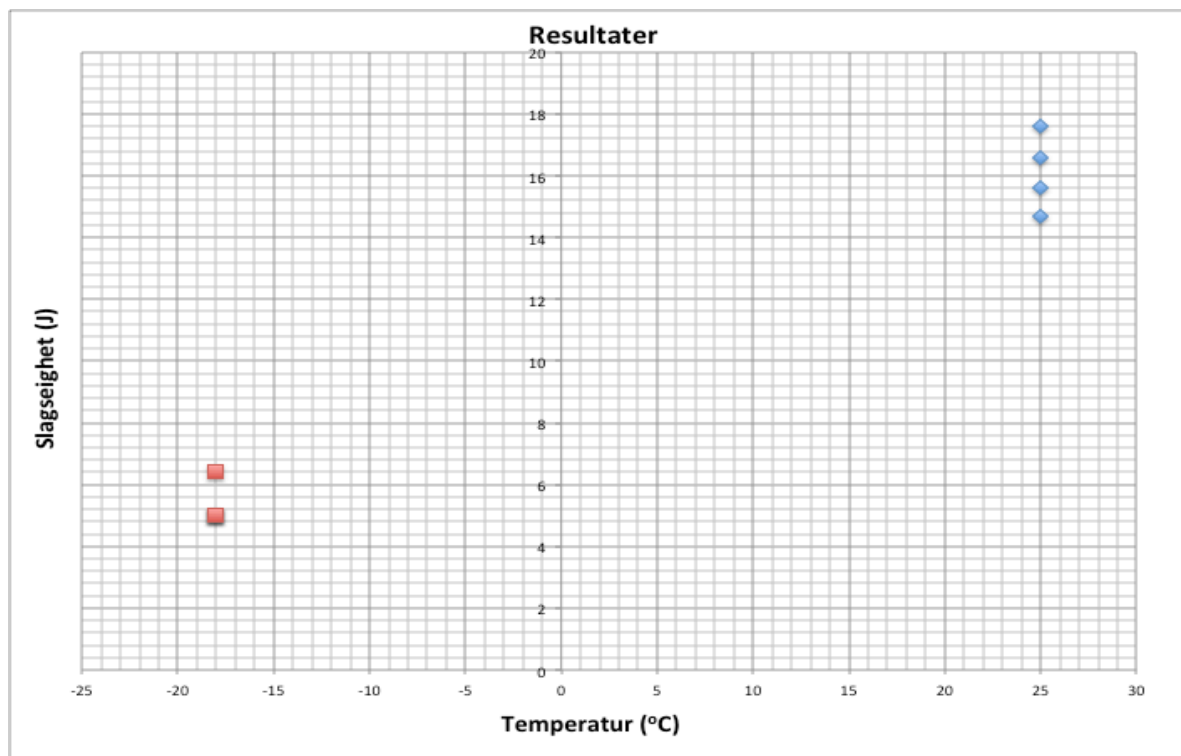
Ved å pakke prøvestavene ned i papir og videre ned i en isolert fryseboks kunne jeg frakte prøvestavene fra fryseren og over til material laboratoriet uten å komme i kontakt med prøvestavene samt prøve å holde en så stabil temperatur som mulig. Dette var med hensyn til at det skulle være så lite varmeoverføring til omgivelsene rundt som mulig. Det var vesentlig at jeg ikke tok på dem med fingrene ettersom dette ville kunne overføre mye varmeenergi.

Denne måten å måle temperaturendringen på er selvsagt ikke helt optimal, fordi det vil alltid forekomme noe varmeoverføring til omgivelsene. Bare tiden fra prøvestaven

var slått av til jeg hadde rukket å plukke den opp igjen, ville det ha blitt overført varmeenergi til omgivelsene allerede. Jeg passet på å plukke opp igjen prøvestavene så raskt som overhode mulig samt at jeg brukte tang med isolerende materiale ved klypende slik at det skulle forekomme så lite varmeoverføring som overhode mulig.

Bruk av varmekamera vil aldri gi helt nøyaktige temperaturavlesninger og i dette tilfellet kan man argumentere for at det kunne vært andre og bedre måter å måle temperaturendringen på. Målet var bare å vise at det oppstår varmeenergi på grunn av slaget og at temperaturen vil stige noe i bruddsonen etter at et brudd har forekommet.

Jeg fikk ikke tak i de eksakte materialdata fra leverandøren av stålet som ble bestilt opp og brukt under testingen. Etter samtaler med verkstedsjefen, fant jeg slagseighetsverdier for S235JR stål i stålhåndboken til Norsk Stål AS. Det nærmeste vi kom var slagseighetsverdien for S235JR på 27Joules ved 20°C [S.24]. Dette var det nærmeste vi kom oppgitt data for akkurat dette stålet.



Figur 86: Grafen viser resultatene under den praktiske testingen. Som vi kan se er bruddene som skjedde ved -16°C klart sprøbrudd. Bruddene som skjedde ved romtemperatur ved 25°C var seige og har derfor mye høyere slagseighet. Derfor antar jeg at bruddene som skjedde ved -16°C er innenfor det nedre grense området og bruddene ved romtemperatur innenfor det øvre grense område.

11.8.5. Estimering av bruddseigheten

Bruker formelen for den øvre grense:

$$K_{mat} = 0,54 \cdot C_v + 55$$

$$K_{mat} = 0,54 \cdot 14,7 + 55$$

$$K_{mat} = \mathbf{62,94MPa\sqrt{m}}$$

Tabell 53: Tabellen viser utregnet K_{mat} verdi for alle målingene ved romtemperatur.

Test ved romtemperatur				
Testnummer	Temperatur før (°C)	Temperatur etter (°C)	Slagseighet (°C)	Bruddseighet K_{mat} MPa \sqrt{m}
1	25	32,3	14,7	62,94
2	25	28	17,6	64,5
3	25	34,7	15,6	63,42
4	25	27,5	16,6	63,96

Bruker formelen for nedre grense:

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{C_v}$$

$$K_{mat,25} = 12 \cdot \sqrt{5}$$

$$K_{mat,25} = \mathbf{26,83MPa\sqrt{m}}$$

Tykkelseskorrigerer:

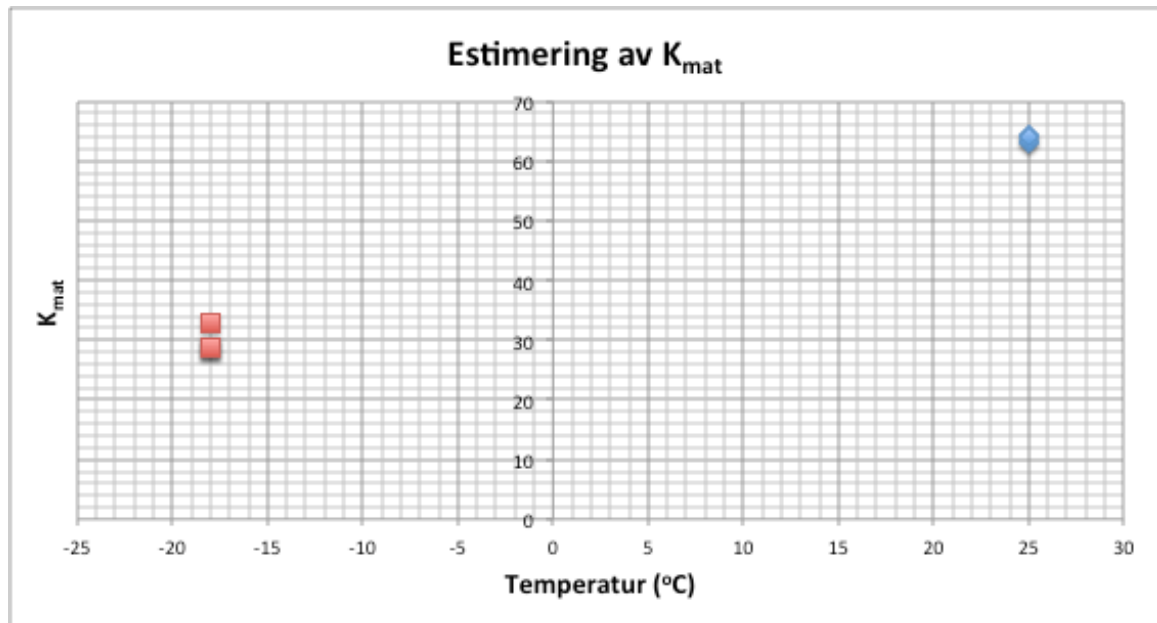
$$K_{mat} = [(K_{mat,25} - 20) \left(\frac{25}{B}\right)^{1/4}] + 20$$

$$K_{mat} = [(26,83 - 20) \left(\frac{25}{10}\right)^{1/4}] + 20$$

$$K_{mat} = \mathbf{28,59MPa\sqrt{m}}$$

Tabell 54: Tabellen viser utregnet K_{mat} verdi for alle målingene ved -16°C.

Test ved -16°C				
Testnummer	Temperatur før (°C)	Temperatur etter (°C)	Slagseighet (J)	Bruddseighet K_{mat} MPa \sqrt{m}
1	-16	-10,9	5	28,59
2	-16	-10,5	6,4	33
3	-16	-10,2	5	28,59
4	-16	-10,9	5	28,59



Figur 87: Viser de estimerte verdiene av bruddseigheten K_{mat} plottet mot temperatur.

11.9. Caseanalyse

Casene gir et innblikk i hvordan man benytter seg av de estimeringsteknikkene som er beskrevet gjennom rapporten. Målet med casene er å gi leseren et innblikk i hvordan de anvendes på en veldig enkel måte og hvordan man skiller mellom de ulike formlene. Ved å variere typer konstruksjonsstål, tykkelser og temperaturforhold har dette gitt spillerom for flere ulike caser. Svakheten ved casene er at de ikke er blitt kvalitetsjekkert opp mot bruddseighets verdier fra bruddseighets tester. Årsaken til at dette ikke er blitt gjort er fordi det er vanskelig å få tak i de aktuelle dataene man trenger dersom man ikke gjennomfører de bruddmekaniske testene selv. Casene har hovedtyngde på formlene som er beskrevet i den Britiske Standarden BS 7910.

De første casene gir et innblikk i de grunnleggende formlene og hvordan disse benyttes. Senere benyttes CTOD verdier og disse konverteres til K_{mat} , estimert bruddseighet ut fra de formlene som er tilpasset CTOD. Her har jeg også brukt forskjellige typer materialer, sett på forskjellige tykkelser og temperaturforhold samt gjort sammenligninger av disse. Dette gir en innføring i bruken av formelverket.

Den praktiske testingen foregikk på material laboratoriet der jeg hadde tilgang til utstyr som var nødvendig for å gjennomføre Charpy slagseighetstesting. Med god hjelp fra verkstedsjef Bjørn Brenna på verkstedet ble den praktiske testingen gjennomført på en meget god og tilfredsstillende måte. Det er helt klart at måten varme målingene ble gjennomført på kan diskuteres og det skal sies at det selvsagt kunne vært gjort på en bedre og mer nøyaktig måte. Til tross for dette ble det likevel vist gjennom varme bildene at temperaturen øker betraktelig rundt bruddsonen.

For å få en fullstendig S-formet slagseighetskurve skulle man åpenbart ha slått av mange flere prøvestaver. Når firmaer og andre institusjoner som driver med stål skal lage Charpy slagseighetskurver for sine materialer slår de gjerne av et mye større antall prøvestaver og bruker middelveien av resultatene de får.

12. Diskusjon og prosessevaluering

Oppgaven gir en god oversikt over de estimeringsteknikker som finnes mellom slagseighet og bruddseighet. Man kan si at hele denne oppgaven har vært et litteraturstudium der en har måttet bruke mye tid på å sette seg inn i et forholdsvis ukjent tema. Erfaring tilsier at det var mye mer informasjon innen temaet enn først forventet, og man kom stadig over nye ting innen litteraturen. Det har faktisk vært en utfordring å sette begrensninger ettersom det var mye bakgrunnsstoff å tilegne seg og mye interessant lesing. Dette er et viktig og interessant tema og det blir bare viktigere og viktigere å tilegne seg ytterligere kunnskap og kompetanse rundt dette temaet. Dette særlig på grunn av at verden går videre inn på ukjente områder, alt fra subsea utvikling innenfor olje og gass industrien, bruken av arktiske områder til romfartsutvikling.

Det er mye som gjenstår og jeg har et ønske om at denne oppgaven skal være et springbrett videre for neste vedkommende som ønsker å skrive en tilsvarende oppgave. Dermed kan man raskere og enklere få en fullstendig oversikt over hva som finnes og raskt tilegne seg grunnleggende bakgrunnsstoff rundt estimeringsteknikkene. Samtidig som leseren får en liten innføring i hvordan formlene kan brukes i praksis gjennom casene. Litteraturreferansene vil kunne gi leseren en god oversikt over hvor det er bra å lete etter ytterligere informasjon, og SINTAP rapportene er absolutt å anbefale. Samtidig er dette temaet under stadig utvikling og det blir veldig spennende å se hva fremtiden vil bringe innen akkurat dette temaet.

12.1. Diskusjon

12.1.1. Bruddseighetstesting

Som bruken av korrelasjonsformelene viste i casene beskrevet i denne rapporten, vil jeg igjen påpeke viktigheten av at dersom bruddmekanisk testing kan gjennomføres, vil dette være det desidert beste. Selv om man kan si at korrelasjonsformlene korrelerer bra, vil de allikevel kun gi et estimat av hva bruddseigheten er. Med hensyn til dimensjonering og sikkerhetsmessige aspekter vil data fra en bruddseighetstest være mer pålitelig enn ved bruk av korrelasjonsformler alene. Derfor vil jeg understreke at bruk av korrelasjonsformlene må brukes med varsomhet.

12.1.2. Caser

Casene som er valgt ut er generelle og hovedmålet med casene er å gi grunnleggende eksempler på hvordan formelverket fungerer i praksis. Det er ikke blitt foretatt noen statistiske analyser som viser hvor bra estimeringsteknikkene korrelerer og om man havner innenfor et akseptabelt og konservativt estimat. Dette har blitt satt på videre arbeid.

12.1.3. Praktisk testing på lab

Hensikten med den praktiske testingen på laboratoriet var for å generere mine egne slagseighetsverdier ved bruk av Charpy slagseighetsapparat. Dermed fikk jeg også

muligheten til å gjøre noe praktisk gjennom mastergradsarbeidet. Som nevnt tidligere kunne målingene gjort med varmekamera vært gjort på en annerledes og mer presis måte.

12.1.4. Kostnadsbesparelser

Noe av det som initierte denne masteroppgaven er det faktum at dersom disse korrelasjonsmetodene fungerer i praksis vil dette kunne gi enorme kostnadsbesparelser for ulike virksomheter verden rundt. Det faktum at man kan finne bruddseighetsverdier ut fra slagseighet gjør sitt til at virksomheter slipper å måtte bruke penger på å gjennomføre dyre og omfattende bruddmekaniske tester.

12.1.5. Materialprøvedata

Når man foretar materialprøvinger på laboratorier må man være kritisk til de resultatene man får. Årsaken til dette er at man ikke skal trekke konklusjoner det ikke er dekning for [S.3]. Dette gjelder både for materialprøving utført i praksis og for bruken av korrelasjonsformlene.

12.2. Forbedringer

Denne oppgaven har hatt en tidsbegrensning på ett semester. Derfor har det vært nødvendig å gjøre noen begrensinger underveis. Det er også enkelte momenter som har blitt utelukket. Hadde de blitt tatt med ville oppgaven kunne gitt enda klarere anbefalinger på hvilke estimeringsteknikker som bør brukes. Forbedringene består blant annet i:

- Finne mer validerende informasjon og eksempler fra andre der estimeringsteknikkene har blitt brukt i praksis tidligere.
- Rapporten mangler grunnleggende validering av estimeringsteknikkene. Videre burde rapporten inneholde en kontroll ved å kunne foreta bruddmekaniske tester og sammenligne disse opp mot de estimerte verdiene. Hvor bra korrelerer de egentlig, og hva slags feilprosent oppstår, og ikke minst havner man innenfor et akseptabelt og konservativt estimat.
- Mer caser der man tester estimerte verdier opp mot allerede eksisterende bruddseighetsverdier. Det var en utfordring å skaffe til veie nok bruddseighetsdata og samtidig ha de riktige slagseighetsverdiene for å kunne stadfeste et godt estimat.
- Jeg har bevisst latt være å gjøre denne oppgaven til en statistikk oppgave der jeg ser på hvor bra formlene korrelerer. Årsaken til dette er fordi det har vært veldig vanskelig å oppdrive verdier på begge sider av formelverket. Til tross for dette antar jeg at dette allerede har blitt gjort som del av arbeidet innenfor SINTAP prosjektet. En forbedring kunne være å lage en case som sammenligner estimerte verdier opp mot bruddseighetsverdier tatt ved bruddmekanisk testing.

Som vurdering av eget arbeid ser jeg i ettertid at dette temaet er enormt stort og omfattende. En av utfordringene har vært å begrense arbeidet i lys av tiden som var til rådighet.

13. Konklusjon

Hovedmålet var å lage en fullstendig rapport som gir et relevant bilde av de estimeringsteknikkene som finnes for å estimere bruddseighet ut fra slagseighet for konstruksjonsstål.

De viktigste funnene har vært:

Informasjon vedrørende industrielle problemer og utfordringer, estimeringsteknikkenes nåværende status og tilnærminger, potensielle problemer med estimeringsteknikkene og industrielle krav satt til estimeringsteknikkene.

Pålitelige korrelasjoner mellom Charpy slagseighet og bruddseighet. En (i) nedre grense korrelasjon, (ii) "The Master Curve Approach" for omslagsområdet, (iii) en korrelasjon for den øvre grensen og (iv) en øvre grense korrelasjon som tar hensyn til flytegrensen. Alle disse stammer fra den Britiske Standarden BS 7910 og den Britiske SINTAP rapporten.

Forholdet mellom K , J og CTOD konverteringer og veiledning for å estimere $T_{27/28J}$ fra Charpy slagseigheter ved andre temperaturer er gitt med utdypende forklaring. I tillegg til dette er det også gitt et avsnitt som tar for seg påvirkning av tøyning.

Et avsnitt som lister opp andre eksisterende Charpy – bruddseighetskorrelasjoner utenom de fra den Britiske Standarden BS 7910 er gitt. En sammenligning av disse er presentert og de er listet opp i en oversiktstabell.

Det ble laget seks utfyllende caser som viser bruken av formelverket. Her har det blitt brukt forskjellige konstruksjonsstål, ulike tykkelser og forskjellige temperaturforhold. Casene er grunnleggende eksempler som viser bruken av formelverket.

Til slutt ble det foretatt praktisk slagseighetstesting på laboratoriet for å generere egne slagseighetsverdier. Deretter ble disse dataene brukt til å estimere bruddseigheten ved bruk av de hensiktsmessige estimeringsformlene.

En bør være varsom på usikkerhetsmomentene rundt bruken av disse estimeringsteknikkene. Men dersom disse formlene benyttes riktig kan det gi en god balanse mellom økonomi og hensyn til sikkerhet.

13.1. Anbefalinger

Denne rapporten har følgende styrker:

- Rapporten gir en god oversikt over estimeringsteknikkene som finnes med hovedvekt på teknikkene fra BS 7910.
- Det er gitt retningslinjer for valg av korrelasjonsmetode.
- Beregningene som er brukt i denne rapporten er grundig gjennomgått.
- Casene som er valgt ut er generelle.
- Man får en oversikt over hvilke estimeringsteknikker som finnes og en sammenligning av disse.
- Det er gitt retningslinjer og eksempler på hvordan estimeringsteknikkene skal anvendes i praksis.
- Gir grunnlag for videre arbeid.

13.2. Videre arbeid

For at rapporten ikke skulle bli for omfattende ble det tidlig gjort en del begrensninger. Derfor bestemte jeg meg tidlig for at jeg måtte spesifisere at jeg kun har hovedfokus på estimeringsteknikkene fra den Britiske Standarden BS 7910. I tillegg oppstod det noen nye problemstillinger underveis. Dette ble derfor punkter som det kan være hensiktsmessig å undersøke senere.

- The Welding Institute (TWI) har gjennomført et prosjekt som ble fullført i 1994, som samlet over 30 publiserte korrelasjoner. Man må ha Industrial Membership hos TWI for å få tilgang til denne rapporten. Jeg har forsøkt å få tilgang til den men lyktes dessverre ikke. Det hadde vært veldig spennende å kunne klart å fått tak i denne rapporten [21].
- Kontrollere slagseigheten og bruddseigheten ved praktisk testing. Bruke så estimeringsteknikkene for å se om man kommer innenfor en akseptabel/konservativt estimat av bruddseigheten. Dermed kan man kontrollere om estimeringsteknikkene faktisk fungerer i praksis og hvor bra de korrelerer.
- Skrive om videre behandling av bruddseighets data, det vil si etter at man har estimert bruddseigheten ved bruk av korrelasjonsformler. Dette står ytterligere forklart i en av SINTAP rapportene [S.18] under kapittel 3.
- Hente inn enda mer informasjon om hva som har blitt gjort tidligere. Jobbet enda mer med å skaffe til veie ytterligere informasjon fra instanser som DNV, Sintef, TWI samt flere og fremskaffet ytterligere kilder på praktisk anvendelse av formelverket.
- Ytterligere informasjon rundt slagseighet og bruddseighet for et materiale slik at man har verdiene på begge sider av formelverket. Gjort statistiske analyser og sett hvor godt estimatene korrelerer med den målte bruddseigheten.
- FAD (Failure Assessment Diagrams).
- Ytterligere forklaring av J-integral.
- Analysere flere caser.

14. LITTERATURREFERANSER

14.1 Skriftlige kilder:

- S.1 **T.L. Anderson**, Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications, ISBN: 0-8493-1656-1, 2005
- S.2 **A.C. Bannister**, Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry SINTAP SUB-TASK 3.3 Report: Final Issue – Determination of fracture toughness from Charpy impact energy: Procedure and validation, 1998
- S.3 **Ørnulf Grøndalen**, Materillære, ISBN: 978-82-7674-621-1, 2002
- S.4 **Per Kristian Larsen**, Konstruksjonsstål – Material Egenskaper (kompendie), 2010
- S.5 **R.J. Sanford**, Principles of Fracture Mechanics, ISBN: 0-13-092992-1, 2002
- S.6 **British Standard**, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures BS 7910, 2005
- S.7 **Geir Terjesen**, Grunnlag i anvendt lineær elastisk brudd mekanikk (LEBM) og sprekkvekst (kompendie), 2012
- S.8 **Geir Terjesen**, Elastisk plastisk bruddmekanikk (EPBM) (kompendie), 2012
- S.9 **David Broek**, The Practical Use of Fracture Mechanics, ISBN: 90-247-3707-9, 1989
- S.10 **P. Nevasmaa & K. Wallin**, Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry SINTAP Task 3 Status Review Report: Reliability Based Methods, 1997
- S.11 **Kim Wallin & Pekka Nevasmaa**, SINTAP Stand-Alone document – VTT Manufacturing Technology FINLAND, 2011
- S.12 **A.C. Bannister**, Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry SINTAP - SUB-TASK 2,3: Yield stress/tensile stress ratio: Results of experimental programme, 1999
- S.13 **Odd Solheim & Johan Andersen**, Materiallære, ISBN: 9788205343498, 2005
- S.14 **Per Kristian Larsen**, Materialelegenskaper (kompendie), 2010
- S.15 **Geir Terjesen**, Mer om korreksjonsfaktorer, belastningsmoduser og slagseighet versus bruddseighet (kompendie), 2012
- S.16 **E. Østby, C. Thaulow, O.M. Akselsen**, Fracture Toughness Scatter and Effect of Constraint in Weld Thermal Simulated HAZ Microstructures at -60°C, ISBN: 978-1-880653-96-8, 2011
- S.17 **Odd M. Akselsen, Erling Østby, Christian Thaulow**, Low Temperature Toughness in SA Welding of 420 MPa Steel, ISBN: 978-880653-96-8, 2011
- S.18 **Kim Wallin, Adam Bannister, Pekka Nevasmaa**, New Unified Fracture Toughness Estimation Scheme for Structural Integrity Assessment
- S.19 **Norsok Standard**, Material Data Sheets for Structural Steel, Norwegian Technology Center, 2000
- S.20 **Rolf Garbo Corneliusen**, Material-prøving / Materialteknikk, ISBN: 82-00-36200-0, 1985



- S.21 **Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs**, Metal Fatigue in Engineering – Second Edition, ISBN: 0-471-51059-9
- S.22 **Norsk Standard**, Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-10: Materialets bruddseighet og egenskaper i tykkelsesretningen, NS-EN 1993-1-10:2005+NA:2009, 2004
- S.23 **A. Almar-Næss**, Stål – Stål med høy styrke og duktilitet for sveiste konstruksjoner – Kriterier for initiering og vekst av sprekker, ISBN: 82-519-0572-9, 1984
- S.24 **Norsk Stål**, Stål, metaller og rustfritt, Stålhåndbok fra Norsk Stål AS

14.2. Internettkilder

1. **Forsidebilde:**
<http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Mechanical%20Properties/Testing.html>
2. **Litt om bruddmekanikk:**
<http://snl.no/bruddmekanikk>
3. **Bilde fra Aleksander Kielland Ulykken:**
[http://no.wikipedia.org/wiki/Alexander_L._Kielland_\(plattform\)](http://no.wikipedia.org/wiki/Alexander_L._Kielland_(plattform))
4. **Bilde fra Aloha Airlines Ulykken:**
<http://www.aloha.net/icarus/>
5. **Konstruksjonsstål brukt i Holmenkollen:**
<http://jdsa.eu/wp-content/uploads/HOP-proj-471.jpg>
6. **Litt om stål:**
www.forskningsrådet.no
7. **NDT-metode:**
<http://no.wikipedia.org/wiki/NDT>
8. **Omslagskurve for stål – Redigert bilde:**
<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/ImpactToughness.htm>
9. **Omslagskurve for stål – Redigert bilde:**
<http://www.fabricatingandmetalworking.com/2012/02/relevance-of-drop-weight-testing-in-the-determination-of-the-reference-nil-ductility-temperature/>
10. **Bruddseighetstest:**
<http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Mechanical%20Properties/Testing.html>
11. **Redigert bilde om bruddseighet:**
<http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=11786&pNid=0>
12. **Charpy omslagskurve brukt i case:**
http://www.sv.vt.edu/classes/MSE2094_NoteBook/97ClassProj/anal/yue/energy.html
13. **Charpy omslagskurve for A36 stål brukt i case:**
<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9801/Felkins-9801.fig.7.lg.gif>
14. **Emissiviteten til konstruksjonsstål:**
www.solarmirror.com/fom/fom-serve/cache/43.html
15. **Konverterings kalkulator for stål – A new vision of steel, Chapel Steel:**
<http://www.chapelsteel.com/ft-lbs-joules.html>
16. **Definisjon på flytespenning:**
<http://no.wikipedia.org/wiki/Flytespenning>
17. **Redigert bilde av Charpy testutstyr:**
<http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-charpy-testing/>
18. **Beskrivelse av ekstrapolering:**
<http://en.wikipedia.org/wiki/Extrapolation>
19. **Forklaring på emissivitet:**
<http://nn.wikipedia.org/wiki/Emissivitet>
20. **Informasjon rundt bruddseighet og SENB:**



<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/FractureToughness.htm>

21. Hjemmesidene til The Welding Institute (TWI):

<http://www.twi.co.uk/>

22. Redigert bilde for CTOD:

<http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/job-knowledge/job-knowledge-76-ctod-testing/>

23. Litt bakgrunns teori rundt skade tolerant design:

http://www.skybrary.aero/index.php/Damage_Tolerance

24. Bilde av bruddflater:

<https://bsclarified.files.wordpress.com/2012/04/titanic-fractured-hull.jpg>

25. Redigert bilde som viser dimensjonene til en Charpy prøvestav:

http://www1.veristar.com/veristar/bvrules/D_1_s2_4_2.html

26. Litt om inneslutninger:

<http://snl.no/inneslutning>

27. Logistic function – S-kurve:

http://en.wikipedia.org/wiki/Logistic_function

15. Vedlegg

A – Refleksjonsnotat

B – Materialdata

C – Oppgavetekst

A. Refleksjonsnotat

Gjennom denne oppgaven har jeg lært enormt mye samtidig som jeg har kunnet kose meg med en oppgave som jeg synes har vært interessant fra dag en av. Erfaringer jeg har bemerket meg fra et slikt prosjekt er at det tar mye lenger tid å sette seg inn i ting enn det jeg hadde forestilt meg på forhånd. Det å danne seg et fullstendig oversiktsbilde tar lenger tid enn man forventer. Selv i dag har jeg mange ubesvarte spørsmål rundt akkurat dette temaet. En annen utfordring jeg støtte på underveis var at det var vanskeligere å skaffe til veie informasjon og erfaringer fra andre ettersom det er få mennesker i Norge med kunnskap rundt akkurat dette. Derfor har det vært mye vanskeligere å skaffe til veie informasjon og kunnskap fra andre enn jeg først hadde regnet med.

Jeg håper at min rapport skal kunne bidra til at neste vedkommende som vil ta en tilsvarende oppgave skal kunne bruke min oppgave som et springbrett. Dermed kan en raskere kunne tilegne seg basiskunnskapen men også raskt kunne få greie på hvor det kan være lønnsomt å lete og hvilke rapporter som er verdt å lese.

Nyttige erfaringer jeg har fått med meg underveis er at man må aldri gi opp. Selv om man ikke får svar på en epost man har sendt ut må man ikke miste håpet på å finne ny og tilstrekkelig informasjon. Jeg har også fått erfare at det jeg trodde var fort gjort ikke nødvendigvis var så lettvinnt som jeg trodde det var til å begynne med. Jeg har vært så heldig å kunne skrive en oppgave som jeg virkelig har trivdes med og det setter jeg stor pris på.

I dette prosjektet har jeg jobbet alene og jeg føler at det har økt min grad av selvstendighet. Gjennom prosjektperioden har jeg hele tiden forsøkt å jobbe selvstendig og målrettet.

B. Materialdata

Materialdata for konstruksjonsstålene brukt i casene og under den praktiske testingen:

Tabell 1: Kjemisk sammensetning av de ulike konstruksjonsstålene [S.12].

Grade	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N	Nb	Ti	V	B	CEV
S275J0	25.0	0.130	0.200	1.05	0.018	0.006	-	-	0.030	0.026	0.030	-	0.002	-	0.013	-	0.312
S355J2	25.0	0.160	0.410	1.36	0.012	0.007	0.011	0.001	0.018	0.044	0.004	-	0.030	0.001	0.003	-	0.394
355 EMZ	25.0	0.089	0.370	1.44	0.009	0.003	<0.020	<0.005	0.510	0.041	<0.020	0.006	0.023	0.005	<0.005	-	0.370
355 EMZ	50.0	0.088	0.360	1.42	0.009	0.003	<0.020	<0.005	0.490	0.042	<0.020	0.006	0.021	0.005	<0.005	-	0.365
450 EMZ	12.5	0.110	0.286	1.44	0.012	0.003	<0.002	<0.005	0.014	0.041	<0.020	0.005	0.003	0.003	0.003	-	0.356
450 EMZ	25.0	0.093	0.290	1.24	0.015	0.002	0.020	0.140	0.430	0.043	<0.020	0.007	<0.005	<0.005	0.050	-	0.372
450 EMZ	50.0	0.090	0.300	1.24	0.016	0.003	0.030	0.180	0.510	0.039	<0.020	0.008	<0.005	<0.005	0.050	-	0.384
S690Q	12.0	0.140	0.400	1.39	0.013	0.002	0.017	0.002	0.018	0.041	<0.020	-	0.037	0.026	0.064	0.003	0.390
S690Q	25.0	0.090	0.410	1.42	0.015	0.002	0.023	0.003	0.022	0.042	0.012	-	0.034	0.038	0.063	0.002	0.387
S690Q	40.0	0.130	0.400	1.41	0.012	0.004	0.170	0.150	0.230	0.033	0.140	0.006	0.032	0.029	<0.005	0.002	0.508
ABR400	12.5	0.130	0.400	1.38	0.013	0.002	0.025	0.003	0.001	0.043	0.008	-	0.037	0.025	0.064	0.002	0.349
ABR400	25.0	0.180	0.391	1.39	0.010	0.003	0.131	0.151	0.242	0.036	0.152	-	0.034	0.025	0.004	0.002	0.449

Tabell 2: Materialbetingelser ved romtemperatur, viser flytegrenser [S.12].

Grade	Thickness (mm)	Values at Room Temperature ⁽¹⁾				
		YS (MPa)	Type	UTS (MPa)	Y/T	N
S275J0	25.0	303	LYS	467	0.649	0.231
S355J2	25.0	397	LYS	559	0.710	0.195
355 EMZ	25.0	436	LYS	548	0.796	0.282
355 EMZ	50.0	374	LYS	508	0.736	0.195
450 EMZ	12.5	500	LYS	593	0.843	0.129
450 EMZ	25.0	471	LYS	565	0.834	0.151
450 EMZ	50.0	495	LYS	589	0.840	0.149
S690Q	12.0	820	LYS	864	0.949	0.071
S690Q	25.0	713	0.2% PS	792	0.900	0.092
S690Q	40.0	746	0.2% PS	859	0.868	0.068
ABR400	12.5	972	0.2% PS	1287	0.755	0.086
ABR400	25.0	991	0.2% PS	1407	0.704	0.157

Tabell 3: Materialbetingelser [S.2].


Grade	Thickness (mm)	Condition	YS (MPa)	T27J (�C)
355EMZ	50	TMCR	366	-106
450EMZ	50	Q&T	490	-98
StE690	40	Q&T	735	-83
StE690	55	Q&T	803	-104
X60	17.5	TMCR	452	-74
X65	17.5	TMCR	489	-85
X65	19.1	TMCR	483	-84
X65	25.4	TMCR	505	-65

Tabell 4: Flytegrensen og K_{IC} verdi for A36 stål benyttet i Case 4 [S.5].

Material; Condition; Environment*	Code†	U. S. Customary Units (ksi, ksi√in)			SI Units (MPa, MPa√mm)		
		YS	UTS	K_{Ic}	YS	UTS	K_{Ic}
[A] Iron, Alloy or Cast ASTM Specification A536 Grd 80-55-06 As cast	A1AC50AB1	58	80	32	400	552	1112
[B] ASTM spec. grd. Steel A10 Series A36 Plt (Dyn K_{Ic} , < 500 Hz); LA, HHA, 3% NaCl ES Weld & HAZ (Dyn K_{Ic} , < 500 Hz); LA, HHA, 3% NaCl							
	B0CB10AB1	44	78	70	303	538	2432
	B0CZK1AB1	44	78	70	303	538	2432

Tabell 5: Tabell fra Norsk Stål sin stålhandbok. Slagseigheten til S235JR er 27Joules ved 20°C [S.24].

ALMINNELIG KONSTRUKSJONSSTÅL OG MASKINSTÅL, VARMVALSET												
Norm	Flytegrense	Strekfasthet	Slagseighet		NS-EN	NS-EN 1)	DIN 1)	SS 1)	BS 1)	ASTM	DNV	Lloyds
	ReH N/mm ²	R _m N/mm ²	KV J	t °C	10025 1993	10025 1991	17 100		4360			
	185	290-510			S185	Fe310-0	St 33	1300-00				
	235	340-470	27	20	S235JR	Fe 360 B	St 37-2	1311-00		A 283 Gr.C		
	235	340-470	27	20	S235JRG1	Fe 360 BFU	USt 37-2					
	235	340-470	27	20	S235JRG2	Fe 360 BFN	RSt 37-2	1312-00	40B	A 284C	NVA/NVE	A/E
	235	340-470	27	0	S235JO	Fe 360C	St 37-3U		40C	A 36		
	235	340-470	27	-20	S235J2G3	Fe 360 D1	St 37-3N		40D	A 573-58		
	235	340-470	27	-20	S235J2G4	Fe 360 D2				A 573-65		
EN 10025 ULEGERTE- STÅL	275	410-560	27	20	S275JR	Fe 430 B	St 44-2	1412-00	43B	A 573-70	NVA 27	
	275	410-560	27	0	S275JO	Fe 430 C	St 44-3 U		43C	A 633A	NVA 27	
	275	410-560	27	-20	S275J2G3	Fe 430 D1	St 44-3 N	1414-00	43D			
	275	410-560	27	-20	S275J2G4	Fe 430 D2		1414-01				
	355	490-630	27	20	S355JR	Fe 510 B		2172-00	50B			
	355	490-630	27	0	S355JO	Fe 510 C	St 52-3 U		50C	A 633C	NVD 36	DH 36
	355	490-630	27	-20	S355J2G3	Fe 510 D1	St 52-3 N	2174-01	50D	A 572-50	NVE 36	EH 36
	355	490-630	27	-20	S355J2G4	Fe 510 D2				A 678 Gr.A		
	355	490-630	40	-20	S355K2G3	Fe 510 DD1						
	355	490-630	40	-20	S355K2G4	Fe 510 DD2						
	295	470-610			E295	Fe 490-2	St 50-2	1550-00 1550-01				
	335	570-710			E335	Fe 590-2	St 60-2	1650-00 1650-01				
	360	670-830			E360	Fe 690-2	St 70-2	1655-00				



ANDERNACH & BLECK
Präzisionszieherei und Kaltwalzwerk

Gepr. 1983

per Email an: sven.solberg@ruukki.com
 Andernach & Bleck, Postfach 80 91 82, 59137 Hagen

Ruukki Norge AS
Postfach P.O.Box 140 Furuset
1001 OSLO
NORWEGEN

Lennestraße 92
59093 Hagen
Telefon : 02331/353-0
Telefax : 02331/353-241
E-Mail : wz@blankstahl.biz
Internet: www.andernach.bleck.com

Werkzeugnis
Test report
Relevé de contrôle
EN 10204

Hagen, 4/07/07MA

Bestell-Nr. / Order no. / N° de commande		Charge / Cont. no. / N° de coupe							
X4577		22292 / 07							
Date of completion / Date d'achèvement		Uns. Auftr.-Nr. / Our order no. / Numéro de commande							
31.05.07		68418 G 01 003							
Gewicht / weight / poids / kg	553	Erzeugnis / product / produit	Blankstahl						
Lieferbedingungen / Condition of delivery / Condition de livraison									
EN 10277 EN 10278									
Stahlart / quality / qualité	Lieferzustand / Condition of treatment / État de livraison	Abmessung / dimension / dimension							
S235JRC	+C	10 MM 4-KT							
Mechanisch-technologische Kennwerte / physical values / valeurs physiques									
R _e MPa	R _m MPa	A %	Z %	HV	HB	HR	KV J	KV J	KV J
Chemische Zusammensetzung Schmelzeanalyse / chemical composition cast analysis / composition chimique de coulée (%)									
C	Si	Mn	P	S	N				
0,091	0,217	0,413	0,017	0,008	0,008				
Bemerkungen / remarks / remarques									

Figur 1: Kvittering fra leverandør for kjøp av stål.

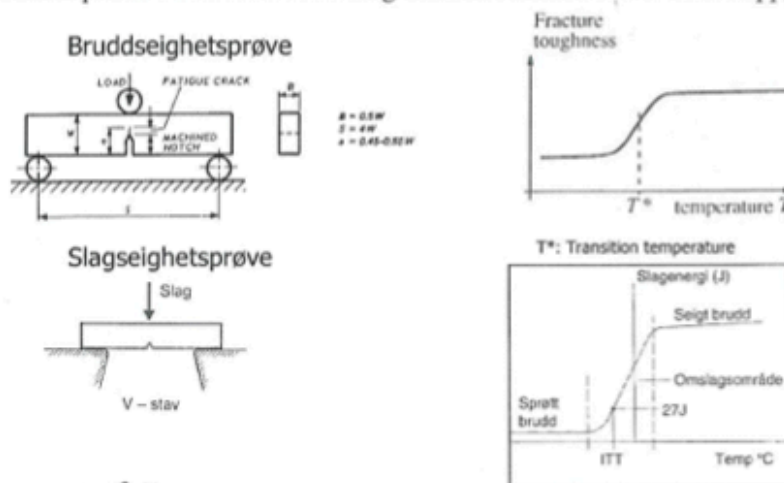
C. Oppgavetekst

Masteroppgave

Tittel: Bruddseighet versus slagseighet for konstruksjonsstål

Bakgrunn:

I skade tolerant design (Damage Tolerant Design) er det nødvendig å kjenne til bruddseigheten til materialet for å gjøre bruddmekaniske vurderinger. Det er svært kostbart å utføre bruddseighetstesting, det er derfor viktig å kunne estimere bruddseighetsdata når vi kjenner slagseigheten. Bruddseigheten til en legering vil blant annet variere med tykkelse og temperatur (konstruksjonsstål). Dette medfører behov for bruddseighetsdata under forskjellige temperatur/tykkelses-forhold. Årsaken til at bruddseighetstesting er kostbart er blant annet at det må lages en utmattingsprekk i prøvestavene og at testemaskin/utstyr/kompetanse er kostbart. Slagseighetstesting er langt rimeligere fordi prøvestaven er enklere (uten utmattingsprekk) og at testmaskinen er enklere. Institutt IMT ved UMB ønsker å styrke fagkunnskapen innenfor dette temaet og vil derfor initiere denne masteroppgaven.



Oppgaven omfatter:

- En litteraturstudie for å studere foreslåtte formler mellom bruddseighet og slagseighet for konstruksjonsstål under forskjellige temperaturforhold.
- Lage en oversiktlig rapport på norsk som gir et relevant bilde av de estimeringsteknikker som finnes for å finne bruddseigheten ut fra slagseighet. Ta utgangspunkt i rapporten "Determination of fracture toughness from Charpy impact energy: Procedure and validation" av A.C. Bannister og legg til det som er nødvendig fra annen litteratur/studier for å lage en oppdatert masteroppgave.
- Lage eksempler (caser) som viser bruken av formelverket.

Mulige utvidelser:

- Praktisk slagseighetstesting på lab og anvendelse av data
- Bruk av FAD-diagrammer (Failure Assessment Diagrams)
- Bruk av BS7910, Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
- Aluminium legeringer