

## Projekt 8.5 Challenger-ulykken

(Projektet er i to dele. Første del indgår også i HEM1 som projekt 9.14. 2. del bygger bl.a. på chi-i-anden fordelingen)

### 1. Præsentation og indledende øvelser

#### 1.1. Triumf og katastrofe

Rumfærgerne var et symbol på menneskehedens teknologiske triumf i slutningen af det 20. århundrede, på samme måde som den usynkelige Titanic var det i starten af århundredet. Rumfærgemissionerne, med den tekniske betegnelse STS (Space Transportation System), startede i 1981 med opsendelsen af rumfærgen Columbia, som forulykkede 1. februar 2003 under nedstigningen. Men allerede i 1986 blev rumfærgeprogrammet ramt af en af den nyere tids mest spektakulære teknologiske ulykker.

Den 28. januar 1986 forulykkede rumfærgen Challenger i en voldsom eksplosion blot 73 sekunder efter den var lettet. Tragedien fik en enorm medieomtale bl.a. fordi det var første gang en skolelærer, Christa McAuliffe, skulle med i rumfærgen. Det var et led i det såkaldte 'Teacher in Space'-program, hvorfor mange amerikanske skoler fulgte opsendelsen intenst. Målet med dette program var at fremme børns og unges interesse for naturvidenskab.

Opsendelsen blev udsat flere gange, men var nu planlagt til at foregå samtidigt med præsidentens årlige tale til nationen, under hvilken præsident Ronald Reagan skulle tale i telefon med bl.a. Christa McAuliffe.



Teamet bag den 25. opsendelse af rumfærgen. Christa McAuliffe står som nummer 2 fra venstre i bagerste række. Rumfærgeprogrammet blev på det tidspunkt opfattet som værende sikkert nok, til at der nu også kunne være civile deltagere ombord.

Det lagde et voldsomt pres på den amerikanske rumfartsorganisation NASA om at undgå flere udsættelser eller direkte aflysning af opsendelsen.



Opsendelsen og den efterfølgende eksplosion blev fulgt over hele kloden. Via NASA's website kan man her: [51-L Movies \(nasa.gov\)](https://www.nasa.gov/movies/51-L-Movies) finde direkte links til videoklip fra opsendelsen.

Siden den første sputnik blev sendt ud i rummet i 1957, var der blevet foretaget hundredvis af opsendelser, så man vidste rent statistisk, at ca. 4%, eller 4 ud af 100 ender galt. Bemandede rumflyvninger tjekkes naturligvis grundigere,

men NASA's ingeniører mente alligevel, at risikoen for et alvorligt uheld var af størrelsesordenen 1%. Administrationen satte derimod risikoen for et alvorligt uheld til  $10^{-5}$ , svarende til 0,001%. Begrundelsen var en lang og kompliceret udregning, som andre fandt totalt meningsløs, idet den byggede på et mylder af forudsætninger, hvoraf mange var vilkårlige og tilsyneladende kun tjente til at vise, at slutrisikoen var af den ønskede størrelse – hvilket ville gøre det forsvarligt at lade civile deltage i rumfærgeprogrammets flyvninger

## 1.2. Havarikommissionen

Havarikommissionen fik fysikeren og nobelpristageren Richard Feynman (1918-1988) som et af sine medlemmer. Det skulle blive Feynman, der løste gåden om rumfærgens forlis, men meget tyder på, at han diskret blev ført på sporet af folk fra NASA, der udmærket godt kendte problemerne, men ønskede løsningen fremlagt af en kendt fysiker udefra. Derved kunne opklaringen få den rigtige effekt, såvel eksternt som internt i den store organisation.

Videoptagelser af ulykken viste, at der lækkede brændende gas ud af nogle sammenføjninger, der åbenbart ikke sluttede tæt. Denne brændende gas så ud til at være hovedårsagen til eksplosionen af hovedtanken. Interessen samlede sig derfor hurtigt om de forskellige sammenføjninger i brændstoftankene, hvor der var anvendt såkaldte O-ringe af gummi som tætning. De er almindeligt anvendt overalt i industrien, men rumflyvninger er ikke almindelig industri, og NASA havde siden 1977 været klar over, at O-ringene var et svagt led. O-ringene var derfor blevet særligt undersøgt efter hver flyvning.

Man havde imidlertid ikke for alvor testet O-ringenes temperaturfølsomhed, og dette skulle vise sig at være den skæbnesvangre fejltagelse. Natten før opsendelsen havde temperaturen været nede på  $-20^{\circ}\text{C}$ , og ved selve opsendelsestidspunktet lå den lige under frysepunktet. Ingen tidligere rumflyvning var foregået ved så lave temperaturer, så man havde ingen erfaringer hermed. Der findes notater fra en telefonsamtale mellem ingeniører fra firmaet Thiokol, der leverede O-ringene, og NASA's ledelse, hvor ingeniørerne netop prøver at få stoppet opsendelsen med henvisning til de lave temperaturer.

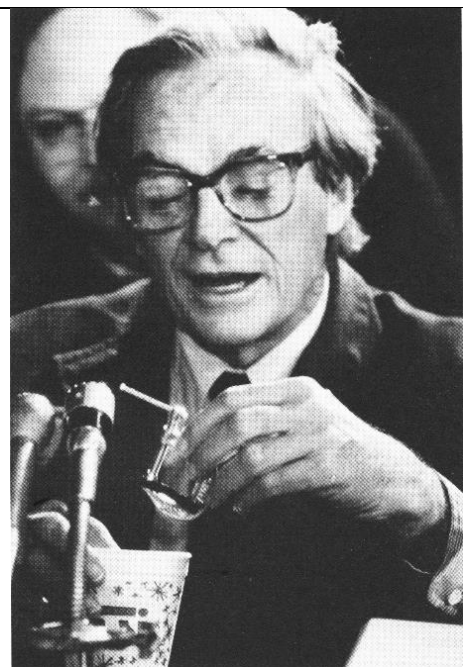
Problemet er, at den voldsomme varmeudvikling under opsendelsen får metaller og andre materialer til at udvide sig – og det skal O-ringene så også gøre for at slutte tæt. Men gør de det hurtigt nok?

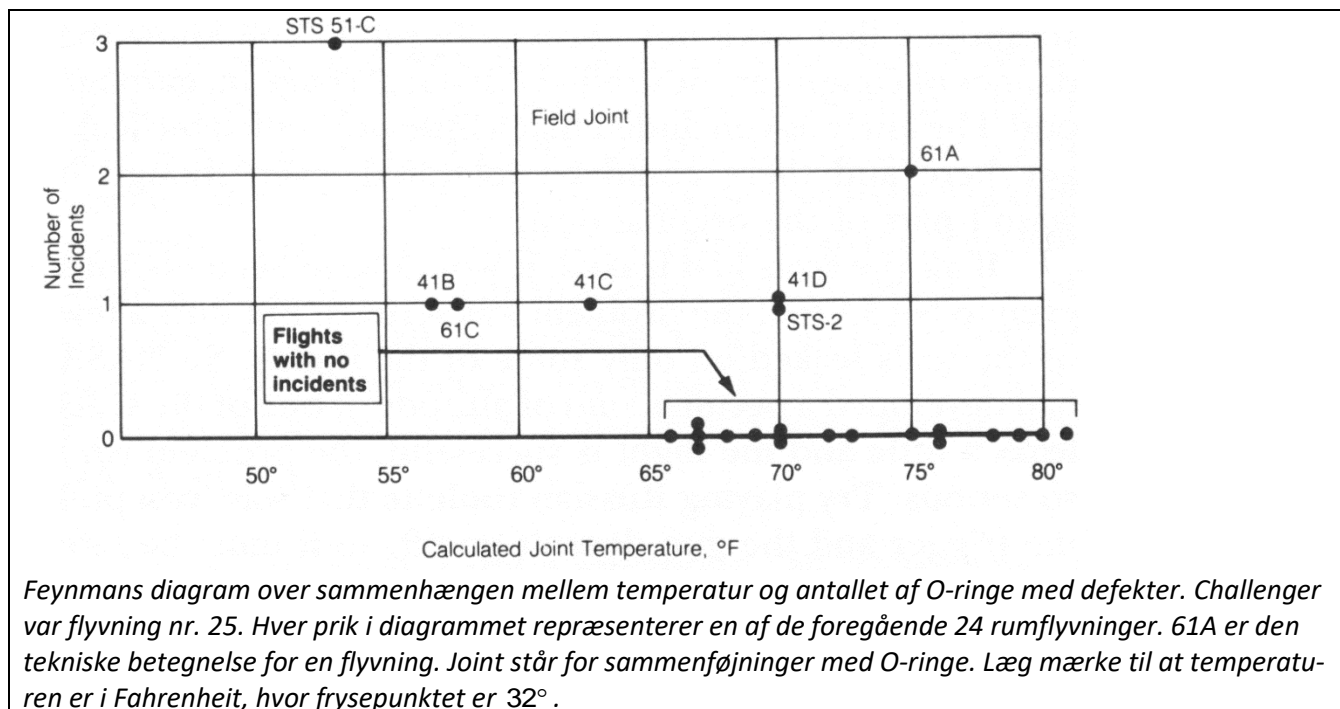
Det lykkedes Feynman at få fat i et stykke af en original O-ring, og ved en offentlig høring foran rullende tv-kameraer demonstrerede han så under stor dramatik, hvordan ringen først stivnede i et glas med isvand, og derefter tog flere sekunder om at rette sig ud og blive fleksibel igen.

Feynman lavede sin egen rapport som et bilag til havarikommissionens samlede rapport. I denne rapport fremlagde han bl.a. et materiale om sammenhængen mellem temperatur og problemer med O-ringene.

Du kan finde en fremstilling af Feynmans rolle i kommissionen her: [The Challenger Disaster – Richard Feynman](#)

Du kan finde Feynmans egen delrapport her: <https://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/51-l/docs/rogers-commission/Appendix-F.txt>





**Øvelse 1 Kvalitative kommentarer**

- a) Hvad er den afhængige variabel, og hvad er den uafhængige variabel i dette diagram?
- b) Ved hvilken flyvning var det tættest på at gå galt? Hvad var temperaturen?
- c) Hvilken tidligere flyvning var den næstmest problematiske? Hvad var temperaturen?
- d) Understøtter diagrammet Thiokols bekymring?

**Øvelse 2 Analyse med brug af boksplot**

Hent [her](#) et regneark med data fra de første 24 rumflyvninger:

Flyvning	Skøn over temperaturen ved O-ringene	Antal beskadigede O-ringe
STS 51-C	53	3
STS 41-B	57	1
STS 61-C	58	1
...	...	...

- a) Udtræk på grundlag af regnearket en tabel med de 17 flyvninger *uden* registrerede O-rings problemer Nummerer disse fra nr. 1 til 17
- b) Tegn et boksplot over disse data og sammenlign med Feynmans diagram.
- c) Tegn et boksplot over temperaturerne for flyvninger *med* O-rings fejl,
- d) Sammenlign de to boksplot med brug af begreber fra den beskrivende statistik.

**Øvelse 3 Analyse med brug af lineær regression**

- a) Plot alle 24 punkter ind i et koordinatsystem, hvor antal uheld afbildes som funktion af temperaturen.
- b) Bestem ved lineær regression den bedste rette linje gennem datapunkterne i det ovenstående diagram. Hvordan kan hældningskoefficienten for denne rette linje fortolkes i denne sammenhæng? Hvad bliver forklaringsgraden?

c) Hvor mange beskadigede O-ringe ville man ifølge modellen forvente ved en opsendelsestemperatur på 30°F? Hvad er din konklusion på dette?

NASA rettede indvendinger mod den ovenstående model. Bl.a. påpegede de, at når det var de beskadigede O-ringe, man var bekymret over, burde man udelukkende tage hensyn til disse i data-analysen.

d) Hvilken lineær regressionsmodel giver denne indskrænkning af datasættet anledning til?

e) Diskuter NASA's indvendinger. Inddrag evt. eksempler fra andre områder, fx køb af bil hvor du efterspørger data, der kan belyse sikkerhedsproblemer med bilen, såsom hvilke uheld denne type bil har været involveret i. Anvender man der NASA's metode?

### 1.3. "Det kan ikke være tilfældigt" – om sandsynligheder og statistik

I øvelse 9.3 undersøgte vi materialet med brug af lineær regression. Hvis der slet ingen sammenhæng var mellem antallet af beskadigede O-ringe og temperaturen, ville vi forvente, at den lineære regression førte til en vandret linje med hældning 0 og forklaringsgraden 0%. Men i praksis observerer vi en negativ hældning, som ligger et stykke under 0, ligesom vi observerer en forklaringsgrad, der ligger et stykke over 0%.

Hvis der slet ingen sammenhæng var mellem temperaturen og problemerne med O-ringene, ville vi tilsvarende forvente, at gennemsnitstemperaturen for de problemfrie flyvninger var den samme som gennemsnitstemperaturen for alle flyvningerne.

Når ulykken først er indtruffet, og vi betragter talmaterialet ovenfor, vil man være tilbøjelig til hurtigt at konkludere: "Det kan ikke være et tilfælde". Sådan reagerer vi ofte på usædvanlige hændelser. Men vi skal være varsomme med den slags hurtige konklusioner i statistik. Selv om der ser ud til at være en sammenhæng mellem temperatur og antallet af beskadigede O-ringe, så er det ikke et bevis. Kaster vi med en terning 24 gange, så vil vi nok forvente at få en sekser 4 gange. Men får vi ingen, eller får vi måske 10 seksere, kan man ikke med sikkerhed sige, der er noget galt. Laver vi et eksperiment, hvor udfaldet helt eller delvist beror på tilfældigheder, vil der altid være en vis sandsynlighed for et usædvanligt udfald af eksperimentet.

Vi vil nu begynde at sætte begreber på, så vi får nogle mere præcise redskaber til at svare på spørgsmål som: *Burde en analyse af det foreliggende datamateriale om O-ringene have givet NASA anledning til at aflyse opsendelsen med henvisning til, at risikoen statistisk set var for stor?*

#### Praxis: Stokastisk eksperiment og sandsynlighed

- ❖ Et eksperiment, hvor udfaldet helt eller delvist beror på tilfældigheder, kalder vi et *stokastisk* eksperiment.
- ❖ I Danmark har 44% blodtype A. Hvis man tilfældigt vælger en dansker, så er sandsynligheden for at få en med blodtype A lig med 44%. Hvis der i en population på i alt  $N$  individer er  $n$  individer, der har en bestemt egenskab, så er sandsynligheden for, at vi ved et stokastisk valg trækker en med pågældende egenskab, lig med  $\frac{n}{N}$

**Praxis: Teoretisk og eksperimentel sandsynlighed**

- ❖ Sandsynligheden for at få en sekser ved kast med en terning sættes til  $\frac{1}{6}$ , fordi der er lige stor sandsynlighed for at få hvert af de 6 mulige udfald.
- ❖ Dette er en teoretisk værdi, som kan efterprøves eksperimentelt: Hvis vi gentager eksperimentet *mange* gange, så vil *andelen* af seksere nærme sig  $\frac{1}{6}$ . *Mange gange* betyder egentlig uendeligt mange gange. I praksis vil vi sige omkring 1000 gange! Hvis andelen ikke nærmer sig  $\frac{1}{6}$ , er det et udtryk for, at den teoretiske værdi ikke er korrekt.

Det forhold mellem teoretisk og eksperimentel sandsynlighed, der er beskrevet ovenfor, kaldes i sandsynlighedsregning for *de store tals lov*. I det følgende vil vi bruge dette som ledetråd. Vi vil undersøge tilfældige variationer eksperimentelt ved at udføre et *stokastisk eksperiment* mange gange for at se efter mønstre og fx svare på, om bestemte udfald ligger inden for den normale variation, eller må karakteriseres som noget meget usædvanligt.

**Øvelse 4. Eksperimentel undersøgelse af situationen**

NASA påstod, at der ikke var nogen sammenhæng mellem temperatur og problemer med O-ringene. De 7 tilfælde med O-rings-problemer kan lige så godt opfattes som en helt tilfældig stikprøve udtaget af de 24 flyvninger. Denne påstand vil vi nu undersøge eksperimentelt. Vi vælger at anvende medianen som ét tal, der repræsenterer temperaturniveauet for en tilfældig stikprøve bestående af 7 flyvninger.

- a) Hver elev laver 24 kort, hvorpå de 24 temperaturer skrives. Kortene blandes grundigt, hvorefter 7 kort tages tilfældigt, fx de 7 øverste. Bestem medianen for de 7 tal.
- b) Gentag 4 gange, så hver elev har 4 talværdier.
- c) Saml klassens tal i et fælles prikdiagram, og tegn et boksplot.
- d) Bestem temperaturmedianen for de 7 rumflyvninger, hvor der var med problemer med O-ringene, og plot den observerede temperaturmedian sammen med boksplottet.

Vi kan nu sammenligne den observerede mediantemperatur med fordelingen af de simulerede mediantemperaturer: Hvis den observerede mediantemperatur ligger midt inde i klumpen er den typisk, hvis den ligger langt ude i enderne, er den atypisk.

- e) Giver jeres eksperiment anledning til bekymring over den kommende flyvning?

## 2. Undersøgelse af Challenger ulykken med brug af hypotesetest – og i et samarbejde med andre fag.

### 2.1 Et oplagt samarbejdsprojekt

Challenger-ulykken er en af de mest spektakulære ulykker i nyere videnskabshistorie, og den er efterfølgende blevet analyseret fra utallige synsvinkler.

*Samfundsfag* har fx interesseret sig for beslutningsprocessen i store firmaer som NASA og forholdet mellem hovedorganisationen og deres partnere, her ingeniørfirmaet Thiokol – ikke mindst de etiske dimensioner i forbindelse med de afgørende beslutninger.

*Fysik* har interesseret sig for spillet mellem ingeniører på den ene side og administratorer på den anden. Fysik har selvfølgelig også interesseret sig for gummiringes opførsel, når de udsættes for kulde.

*Matematik* har interesseret sig for statistikken bag uheldet: Burde opsendelsen være stoppet på basis af den tilgængelige information – og hvad var egentlig den tilgængelige information?

*Humanistiske fag som dansk/engelsk* har interesseret sig for kommunikationsproblemerne: Hvordan kan man mere effektivt fremlægge problemerne skriftligt såvel som mundtligt. Tilsvarende har de interesseret sig for de retoriske aspekter af de mange høringer.

Mange fag kan således byde ind på et problemfelt som dette, og ikke mindst de matematisk-naturvidenskabelige fag kan opnå en dybere forståelse af spillet mellem deres eget fag og det omgivende samfund.

Dette del af projektet fokuserer primært på de statistiske aspekter af problemfeltet og følger således op på de øvelser, der allerede er præsenteret i den indledende historie og afrunder den bekræftende statistik med eksempler på, hvordan man i praksis kan udføre statistiske test i denne sammenhæng.

Ønsker man at bruge emnet i et bredere tværfagligt samarbejde er der dels hjælp at hente i litteraturen, dels i de mangfoldige artikler på internettet. Her vil vi først pege på fire bøger, der går i dybden med forskellige perspektiveringer af Challenger ulykken:

				
<p><b>Claus Jensen:</b> <i>Challenger – et teknisk uheld.</i> Samleren 1993 (Bogen er udsolgt, men findes fx på mange biblioteker)</p>	<p><b>Claus Jensen:</b> <i>No Downlink</i>, New York 1996. Den amerikanske udgave af Challenger – et teknisk uheld.</p>	<p><b>Richard Feynman:</b> <i>What do you care what other people think</i>, Norton 1988 (Omhandler bl.a. Feynmans rolle i kongreshøringerne)</p>	<p><b>Diane Vaughan:</b> <i>The Challenger Launch Mission</i>, Chicago University Press 1997.</p>	<p><b>Edward Tufte:</b> <i>Visual Explanations</i>, Graphics Press 1997. (Indeholder analyser af Thiokols fremlæggelser, samt Feynmans iseksperiment)</p>

NASA's hjemmeside indeholder mange interessante dokumenter vedrørende fx kongreshøringerne:

#### Report of the PRESIDENTIAL COMMISSION on the Space Shuttle Challenger Accident

Rapporten fra denne såkaldte Rogers-kommission kan hentes her:

[Presidential Commission Report on Space Shuttle Challenger Accident \(nasa.gov\)](https://www.nasa.gov/pdf/1986001main/rogers-report-1986)

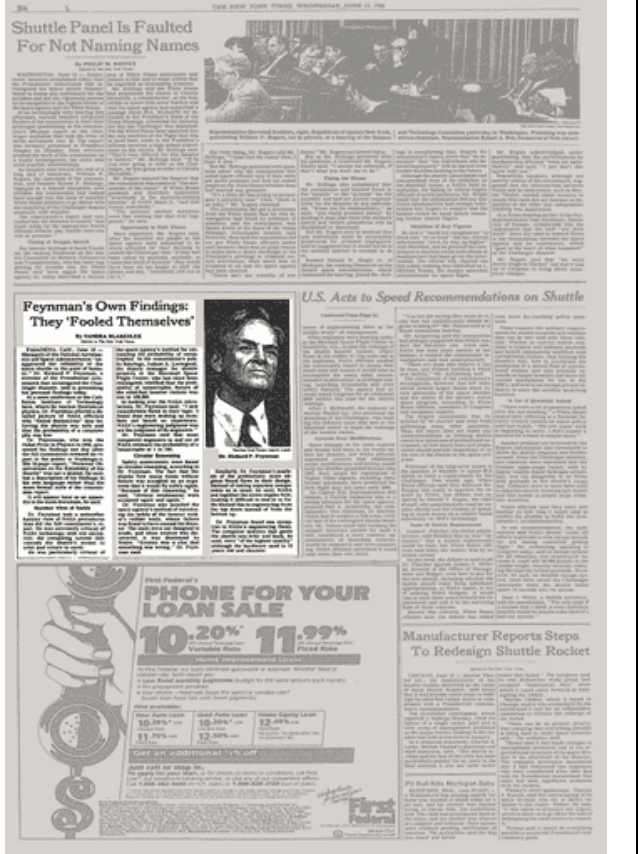
NB! Rapporten er desværre ikke fuldstændigt tilgængelig fra denne adresse, og mange af de 'skjulte' afsnit finder man bedst ved at google direkte på temaer!

Feynmans eget selvstændige bidrag udkom som et appendiks, og kan findes her: <https://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/51-l/docs/rogers-commission/Appendix-F.txt>

New York Times' omtale af samme Roger-kommissionens rapport – og af Feynmans i opsætning.

Særligt betydningsfulde vidnesbyrd kom fra Roger M. Boisjoly's, der arbejdede hos Thiokol, med ansvar for sikkerheden bag O-ringene. Han advarede mod det forløb, der skete, allerede flere uger før, da han kunne se, at man risikerede frostgrader på opsendelsesdagen. Han deltog i telefonmødet mellem Thiokol og NASA, hvor NASA vred armen rundt på Thiokol, og hvor firma bøjede sig og accepterede at undlade at advare de øverste ansvarlige. Han blev efterfølgende fyret fra Thiokol. Han betragtes som en af de første whistle-blowere, og fik den amerikanske videnskabskomites særlige pris for høj etisk standard i sin forvaltning af sit ansvar.

Der findes en række Youtube videoer hvor han holder foredrag eller deltager i diskussioner om katastrofen. Følgende er gode at orientere sig i (de varer mere end 1 time hver!):



[Roger Boisjoly at MIT 1989 - Engineering Ethics: Constructive Responses to Difficult Situations - YouTube](#)  
[Unethical Decisions - The Causes of the Space Shuttle Challenger Disaster Roger Boisjoly - YouTube](#)

## 2. Statistikken bag Challenger-ulykken – den beskrivende del

Lad os først se på data. På telefonmødet med NASA dagen før opsendelsen faxede Thiokol bl.a. følgende tabeller:

[Ref. 2/14-5] HISTORY OF O-RING DAMAGE ON SRM FIELD JOINTS.

HISTORY OF O-RING DAMAGE ON SRM FIELD JOINTS

	SRM No.	Cross Sectional View			Top View		Clicking Location (deg)
		Erosion Depth (in.)	Perimeter Affected (deg)	Nominal Dia. (in.)	Length Of Max Erosion (in.)	Total West Affected Length (in.)	
61A LH Center Field**	22A	None	None	0.280	None	None	36° - 66°
61A LH CENTER FIELD**	22A	NONE	NONE	0.280	NONE	NONE	338° - 18°
51C LH Forward Field**	15A	0.010	154.0	0.280	4.25	5.25	163
51C RH Center Field (prim)***	15B	0.038	130.0	0.280	12.50	58.75	354
51C RH Center Field (sec)***	15B	None	45.0	0.280	None	29.50	354
41D RH Forward Field	13B	0.028	110.0	0.280	3.00	None	275
41C LH Aft Field*	11A	None	None	0.280	None	None	--
41B LH Forward Field	10A	0.040	217.0	0.280	3.00	14.50	351
31S-2 RH Aft Field	2B	0.053	116.0	0.280	--	--	90

\*Hot gas path detected in putty. Indication of heat on O-ring, but no damage.  
 \*\*Soot behind primary O-ring.  
 \*\*\*Soot behind primary O-ring, heat affected secondary O-ring.

Clicking location of leak check port - 0 deg.

OTHER SRM-15 FIELD JOINTS HAD NO BLOWHOLES IN PUTTY AND NO SOOT NEAR OR BEYOND THE PRIMARY O-RING.

SRM-22 FORWARD FIELD JOINT HAD PUTTY PATH TO PRIMARY O-RING, BUT NO O-RING EROSION AND NO SOOT BLOWBY. OTHER SRM-22 FIELD JOINTS HAD NO BLOWHOLES IN PUTTY.

[Ref. 2-14-3 2 of 13]

<p>Hearings of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident: February 6, 1986 to February 25, 1986</p> <p>FEBRUARY 14, 1986 SESSION</p> <p>[671] [Ref. 2/14-14] History of O-ring temperatures</p> <p style="text-align: center;">LITING - W HISTORY OF O-RING TEMPERATURES (DEGREES - F)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>MOTOR</th> <th>MGT</th> <th>AMB.</th> <th>O-RING</th> <th>WIND</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>DM-4</td><td>68</td><td>36</td><td>47</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>DM-2</td><td>76</td><td>45</td><td>52</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>QM-3</td><td>72.5</td><td>40</td><td>48</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>QM-4</td><td>76</td><td>48</td><td>51</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>SRM-15</td><td>52</td><td>64</td><td>53</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>SRM-22</td><td>77</td><td>78</td><td>75</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>SRM-25</td><td>55</td><td>26</td><td>29</td><td>10 MPH 28 MPH</td></tr> </tbody> </table> <p>1-D THERMAL ANALYSIS</p> <p>[Ref. 2/14-3 11 of 11]</p>	MOTOR	MGT	AMB.	O-RING	WIND	DM-4	68	36	47	10 MPH	DM-2	76	45	52	10 MPH	QM-3	72.5	40	48	10 MPH	QM-4	76	48	51	10 MPH	SRM-15	52	64	53	10 MPH	SRM-22	77	78	75	10 MPH	SRM-25	55	26	29	10 MPH 28 MPH	<p>Hearings of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident: February 6, 1986 to February 25, 1986</p> <p>FEBRUARY 14, 1986 SESSION</p> <p>[671] [Ref. 2/14-14] History of O-ring temperatures</p> <p style="text-align: center;">LITING - W HISTORY OF O-RING TEMPERATURES (DEGREES - F)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>MOTOR</th> <th>MGT</th> <th>AMB.</th> <th>O-RING</th> <th>WIND</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>DM-4</td><td>68</td><td>36</td><td>47</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>DM-2</td><td>76</td><td>45</td><td>52</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>QM-3</td><td>72.5</td><td>40</td><td>48</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>QM-4</td><td>76</td><td>48</td><td>51</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>SRM-15</td><td>52</td><td>64</td><td>53</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>SRM-22</td><td>77</td><td>78</td><td>75</td><td>10 MPH</td></tr> <tr><td>SRM-25</td><td>55</td><td>26</td><td>29</td><td>10 MPH 28 MPH</td></tr> </tbody> </table> <p>1-D THERMAL ANALYSIS</p> <p>[Ref. 2/14-3 11 of 11]</p>	MOTOR	MGT	AMB.	O-RING	WIND	DM-4	68	36	47	10 MPH	DM-2	76	45	52	10 MPH	QM-3	72.5	40	48	10 MPH	QM-4	76	48	51	10 MPH	SRM-15	52	64	53	10 MPH	SRM-22	77	78	75	10 MPH	SRM-25	55	26	29	10 MPH 28 MPH
MOTOR	MGT	AMB.	O-RING	WIND																																																																													
DM-4	68	36	47	10 MPH																																																																													
DM-2	76	45	52	10 MPH																																																																													
QM-3	72.5	40	48	10 MPH																																																																													
QM-4	76	48	51	10 MPH																																																																													
SRM-15	52	64	53	10 MPH																																																																													
SRM-22	77	78	75	10 MPH																																																																													
SRM-25	55	26	29	10 MPH 28 MPH																																																																													
MOTOR	MGT	AMB.	O-RING	WIND																																																																													
DM-4	68	36	47	10 MPH																																																																													
DM-2	76	45	52	10 MPH																																																																													
QM-3	72.5	40	48	10 MPH																																																																													
QM-4	76	48	51	10 MPH																																																																													
SRM-15	52	64	53	10 MPH																																																																													
SRM-22	77	78	75	10 MPH																																																																													
SRM-25	55	26	29	10 MPH 28 MPH																																																																													

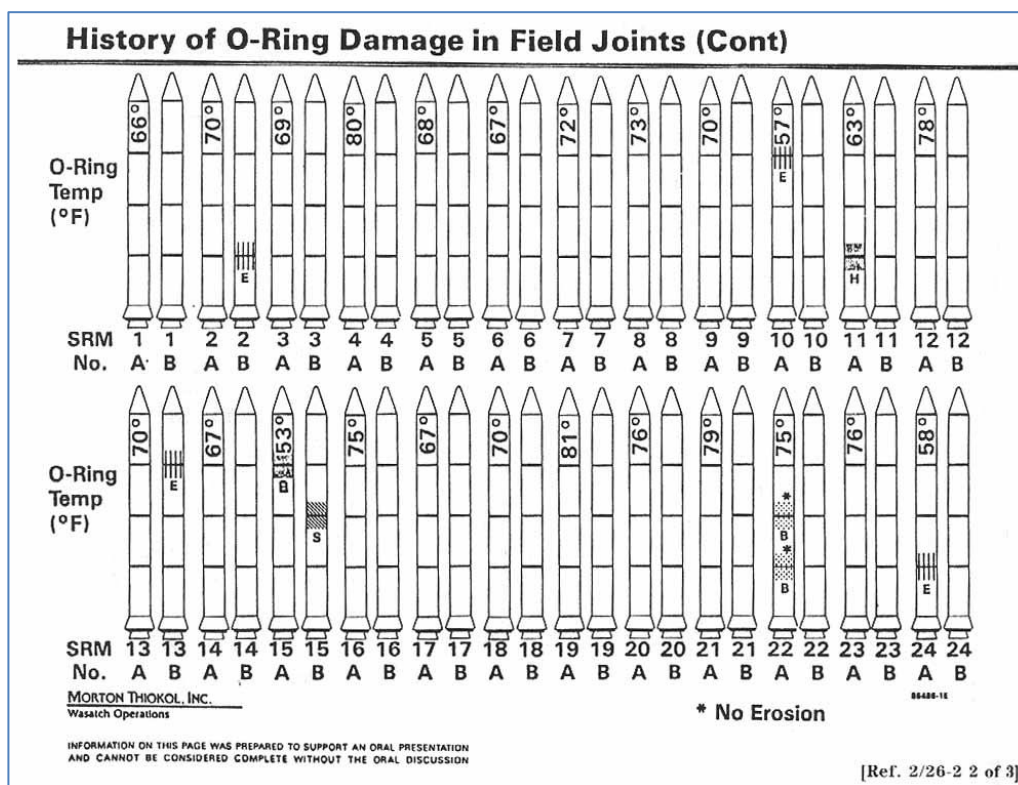
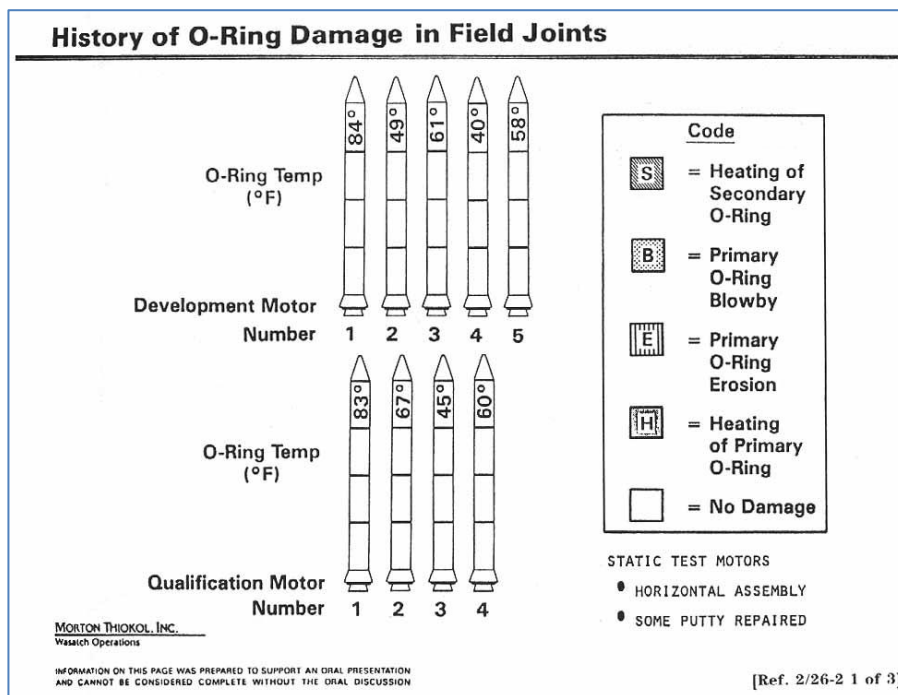
<p>Hearings of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident: February 6, 1986 to February 25, 1986</p> <p>FEBRUARY 14, 1986 SESSION</p> <p>[672] [Ref. 2/14-15] Conclusions</p> <p>CONCLUSIONS :</p> <p>TEMPERATURE OF O-RING IS NOT ONLY PARAMETER CONTROLLING BLOW-BY</p> <p>SRM 15 WITH BLOW-BY HAD AN O-RING TEMP AT 53°F SRM 22 WITH BLOW-BY HAD AN O-RING TEMP AT 10°F FOUR DEVELOPMENT MOTORS WITH NO BLOW-BY WERE TESTED AT O-RING TEMP OF 47° TO 52°F</p> <p>DEVELOPMENT MOTORS HAD PUTTY PACKING WHICH RESULTED IN BETTER PERFORMANCE</p> <p>AT ABOUT 50°F BLOW-BY COULD BE EXPERIENCED IN CASE JOINTS</p> <p>TEMP FOR SRM 25 ON 1-28-86 LAUNCH WILL BE 29°F 9 AM 38°F 2 PM</p> <p>HAVE NO DATA THAT WOULD INDICATE SRM 25 IS DIFFERENT THAN SRM 15 OTHER THAN TEMP</p> <p>[Ref. 2/14-3 12 of 11]</p>	<p>Hearings of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident: February 6, 1986 to February 25, 1986</p> <p>FEBRUARY 14, 1986 SESSION</p> <p>[673] [Ref. 2/14-16] Recommendations</p> <p>RECOMMENDATIONS :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>° O-RING TEMP MUST BE <math>\geq 53^\circ\text{F}</math> AT LAUNCH</li> <li>DEVELOPMENT MOTORS AT <math>47^\circ\text{F}</math> TO <math>52^\circ\text{F}</math> WITH PUTTY PACKING HAD NO BLOW-BY</li> <li>SRM 15 (THE BEST SIMULATION) WORKED AT <math>53^\circ\text{F}</math></li> <li>° PROJECT AMBIENT CONDITIONS (TEMP &amp; WIND) TO DETERMINE LAUNCH TIME</li> </ul>
---	--

Øvelse 5. Kvalitativ analyse af tabellerne

- a) De to mest problematiske flyvninger er SRM-15 og SRM-22 i Thiokols notation (flyvning nr. 15 og flyvning nr. 22). Hvor kan man finde oplysninger om disse to flyvninger i de ovenstående oversigtstabeller? Tabellerne omtaler også fire testmotorer, der slet ikke har været ude at flyve. Hvorfor inddrages de i diskussionen?  
Bemærk: *Blow By* er udstrømmende gas, som i uheldigste fald kan føre til katastrofale eksplosioner. Men *Nozzle Blow-By* er derimod ikke et problem i den forbindelse!
- b) Hvor kan man se i disse tabeller, at der er en mulig sammenhæng mellem lav temperatur og problemer med O-ringe?
- c) Hvad går deres konklusioner ud på? Hvad går deres anbefalinger ud på? Hvilken støtte er der for deres konklusioner og anbefalinger i de ovenstående tabeller?



Thiokols ingeniører fik efter uheldet endnu en chance for at forklare sig i kongreshøringerne. Denne gang skiftede de fra tabeller til diagrammer, de skiftede med andre ord til en grafisk repræsentation:



#### Øvelse 6. Kvalitativ analyse af diagrammerne

- Den første slide er et standarddiagram knyttet til test af raketmotorerne. Den anden slide opsummerer resultaterne af de forudgående 24 flyvninger (idet hver rumfærgeløftes af to motorer). Gennemgå opbygningen af de to diagrammer. Hvilke informationer kan man finde på diagrammerne?
- Hvor kan man se i disse diagrammer, at der er en mulig sammenhæng mellem lav temperatur og problemer med O-ringe? Hvordan kunne diagrammet tydeliggøres for at fremhæve denne sammenhæng?

### 3. Statistikken bag Challenger-ulykken – Hypotesetest kommer på banen

Vi vender nu tilbage til den statistiske test baseret på tabellen over de første 24 rumfærgeflyvninger, jfr. øvelse 2 i afsnit 1. Data i tabellen kan du hente [her](#).

Flyvning	Skøn over temperaturen ved O-ringene	Antal beskadigede O-ringe
"STS 51-C"	53	3
"STS 41-B"	57	1
"STS 61-C"	58	1
"STS 41-C"	63	1
"STS-1"	66	0
"STS-6"	67	0
"STS 51-A"	67	0
"STS 51-D"	67	0
"STS-5"	68	0
"STS-3"	69	0
"STS-2"	70	1
"STS-9"	70	0
"STS 41-D"	70	1
"STS 51-G"	70	0
"STS-7"	72	0
"STS-8"	73	0
"STS 51-B"	75	0
"STS 61-A"	75	2
"STS 51-I"	76	0
"STS 61-B"	76	0
"STS 41-G"	78	0
"STS 51-J"	79	0
"STS-4"	80	0
"STS 51-F"	81	0

#### Øvelse 7. Challenger-ulykken som en formelbaseret $\chi^2$ -test

$\chi^2$ -test kan udføres når vi har opdelt datamaterialet på to kategoriske variable. Vi grupperer derfor såvel temperaturen som antallet af uheld. Grupperingen af uheld giver sig selv. Grupperingen af temperaturerne foretages så antallet af observationer i hvert interval ikke bliver alt for lille, men samtidig skal antallet af intervaller være så tilpas stor, at informationstabet i forhold til tabellens rå data begrænses, dvs at spredningen også afspejles i de grupperede data. Vi skal også fastlægge et signifikansniveau, som vi vælger til 5%.

a) Udfyld den følgende antalstabel for de 24 flyvninger

Krydstabel for Challenger-ulykken		Uheld med O-ringene	
		Ja	Nej
Temperatur-intervaller	50-59 Lav		
	60-69 Mellem		
	70-79 Høj		
	80-89 Meget høj		

b) Gøre rede for nulhypotesen og opstil den tilhørende krydstabel for de forventede værdier. Hvad bliver antallet af frihedsgrader?

c) Udregn den tilhørende teststørrelse, gerne med de enkelte bidrag fordelt på en krydstabel som den ovenstående.

d) Udregn p-værdien hørende til den observerede krydstabel. Konklusion? Er afvigelsen statistisk signifikant?

e) Hvilke celler bidrager mest til teststørrelsen? Konklusion?

I forlængelse af Afsnit 1, øvelse 3 om den lineære regression kan vi nu undersøge eksperimentelt, om den fundne hældningskoefficient er statistisk signifikant på signifikansniveauet 5%.

### Øvelse 8: Challenger-ulykken som en eksperimentelt baseret test af den lineære regression

Ifølge nulhypotesen er antallet af beskadigede O-ringe uafhængigt af temperaturen. Vi kan simulere denne nulhypotese ved at omrøre i den ene af variablene, fx antal uheld.

a) Opret to søjler i dit dynamiske regneark med de observerede værdier for temperatur og antal uheld. De to søjler repræsenterer udfaldene for de 24 forudgående flyvninger. Udfør lineær regression og registrer den tilhørende observerede hældning.

b) Foretag nu en omrøring af antal uheld og udfør den lineære regression for de omrørte antal uheld som funktion af temperaturen. Registrer den tilhørende omrørte hældning.

c) Vi vil nu bruge hældningen som teststørrelse. Hvad er den forventede værdi for hældningen ifølge nulhypotesen? Gentag omrøringen 20 gange og læg mærke til hvor mange gange du opnår et udfald, der er lige så skævt som det observerede. Gør rede for hvorfor 20 gentagelser netop svarer til en primitiv test på signifikansniveauet 5%.

d) Hvis du har mulighed for det i dit dynamiske regneark, kan du nu gentage omrøringen fx 500 gange og foretage en automatisk opsamling af teststørrelserne i en særskilt søjle. Disse målinger kan efterfølgende repræsenteres ved dels en antalstabel, dels et passende histogram. Uddrag på basis af denne simulering et skøn over p-værdien. Konklusion? Er den fundne hældning statistisk signifikant?

## 4. Konklusioner

Der kan naturligvis uddrages mange forskellige konklusioner af et sådant projekt. Her vil vi hæfte os ved nogle få perspektiver for kommende ingeniører/matematikere/naturvidenskabsmænd og kvinder.

- Thiokols ingeniører fejlede tydeligvis i at fremlægge et klart og forståeligt budskab for ikke-fagfolk, i første omgang NASA's administration, men det gik heller ikke meget bedre ved kongreshøringerne.
- I modsætning hertil bragede Feynman igennem på kongreshøringerne med sit budskab på trods af, at hans argumentation videnskabeligt set ikke var overbevisende. Hans sans for drama og hans suveræne beherskelse af retoriske virkemidler fornægtede sig ikke.

### Øvelse 9:

Prøv at sammenfatte, hvad forløbet omkring Challenger-ulykken viser omkring betydningen af etiske problemstillinger indenfor naturvidenskaberne og evnen til at kommunikere et teknisk/naturvidenskabeligt problemfelt klart og forståeligt til ikke-fagfolk.