

Beregning av bæreevne på Flyplass PCR - verdi

av

Hans Christian Korsgaard
Pavement Experts ApS



Invitasjon til
NADim-seminar
Dimensjoneringsgruppen

Oslo 27 November 2025



Outline

- ACR – PCR Systemet
- Teorien bag ACR – PCR Systemet
- Beregningsgrundlag
- Eksempler fra Flyplass
- Sammendrag





Bæreevнемålinger med Heavy Weight faldlodsmåler, HWD:
Safe Control AS
v. Ivar Faksdal

PCR beregninger:
Pavement Experts ApS
v. Hans Christian Korsgaard



Single wheel loads of selected heavy aircraft types:

BOEING 737-800	- 185 kN / 18.8 t	Dual Gear
AIRBUS A321neo	- 227 kN / 23.1 t	Dual Tandem Gear
AIRBUS A330-300	- 271 kN / 27.7 t	Dual Tandem Gear
BOEING 787-900	- 297 kN / 30.3 t	Dual Tandem Gear
AIRBUS A350-900	- 326 kN / 33.3 t	Dual Tandem Gear
BOEING 777-300ER	- 273 kN / 28.0 t	Dual Tridem Gear





Det nye system:

ACR – PCR systemet

ACR: "Aircraft Classification Rating"

PCR: "Pavement Classification Rating"

ICAO Rule:

$ACR < PCR$

Unrestricted usage of Aircrafts with an ACR lower than or equal to the PCR value of the pavement





Det gamle system:

ACN – PCN systemet:

PCN: "Pavement Classification Number"

ACN: "Aircraft Classification Number"

ICAO Rule:

$ACN < PCN$

Unrestricted usage of Aircrafts with an ACR lower than or equal to the PCR value of the pavement





Det er alligevel ikke det samme
I det gamle system:

- PCN værdien var alene et udtryk for belægningens bæreevnemæssige tilstand
- ACN værdien var alene et udtryk for flyets belastning på belægningen

I det nye system:

- PCR værdien skal nu beregnes på grundlag af:
 - ❖ Belægningens bæreevnemæssige tilstand
 - ❖ Den flybelastning belægningen udsættes for
- ACR værdien er stadigvæk alene et udtryk for flyets belastning på belægningen



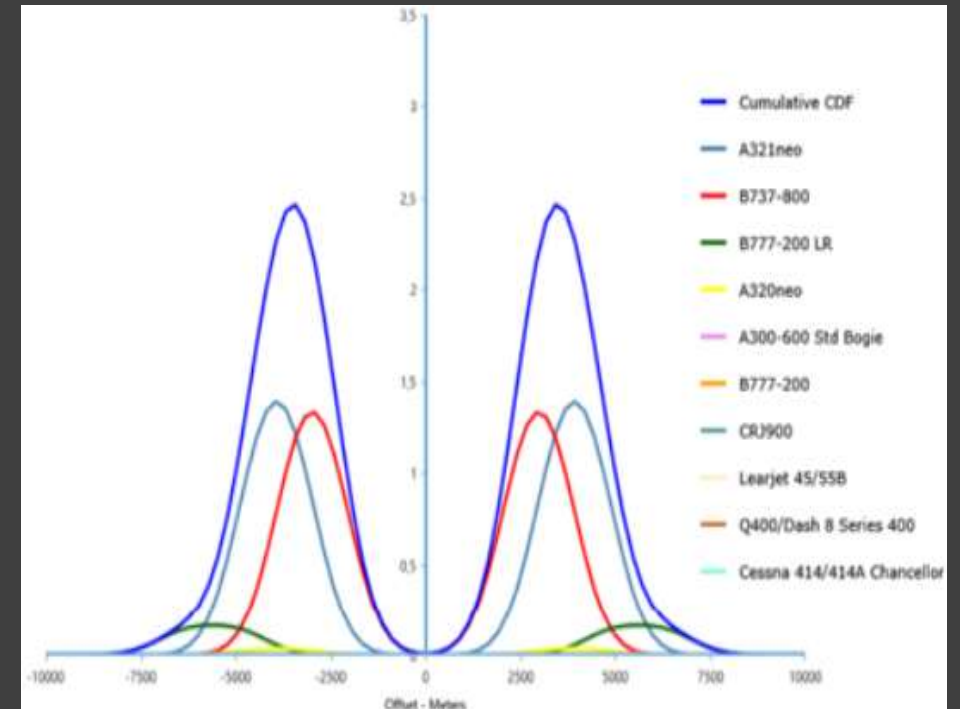


Hvordan skal fly-belastningen så indgå i beregningen af PCR værdien ?

- ❖ Belægnings-lagenes E-moduler
Backcalculation af faldlodsmålingerne
- ❖ Flytrafikkens Accumulerede Damage Factor (CDF)
Bestemt pga. Damage Factor fra hver fly-type

Damage Factor for hver fly-type indeholder:

- Designperiode (20 år anbefales)
- Antal årlige starter
- Tilvækst i designperioden
- Wandering (normal fordelt)
- Flyets last (normalt MTOW)
- Flyets dæktryk
- Pass to coverage ratio (P/TC)





Eksempel: Runway, Asfalt

PCR verdi: **1.296** F/C/X/T (Beregnet med FAA's software: Faarfield 2.1.1)

- F : Flexible (Asfalt belægning)
- C : Underbund type C (60-100 MPa)
- X : Dæktryk < 1,75 MPa
- T : Teknisk bestemt

ACR verdier:

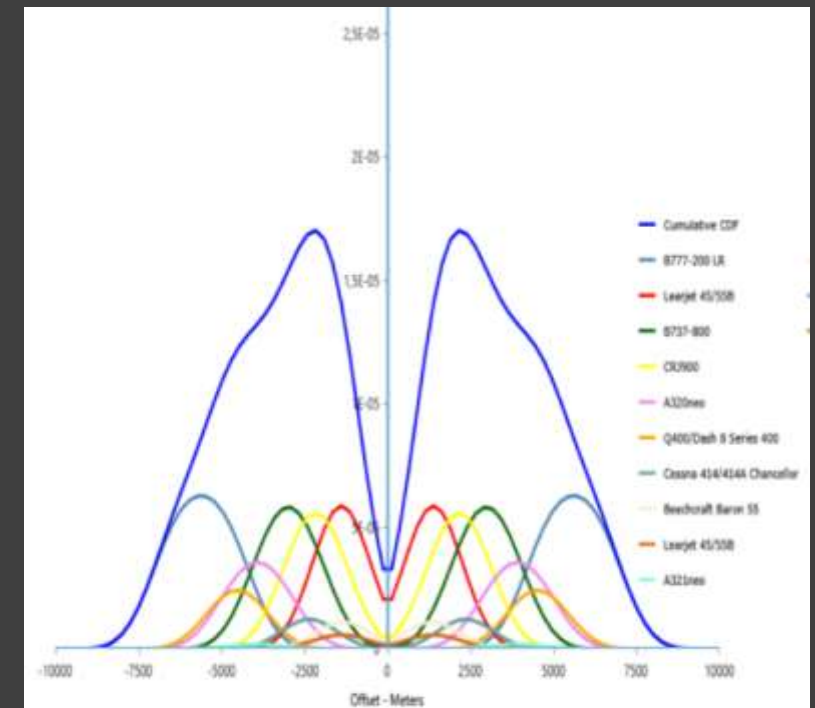
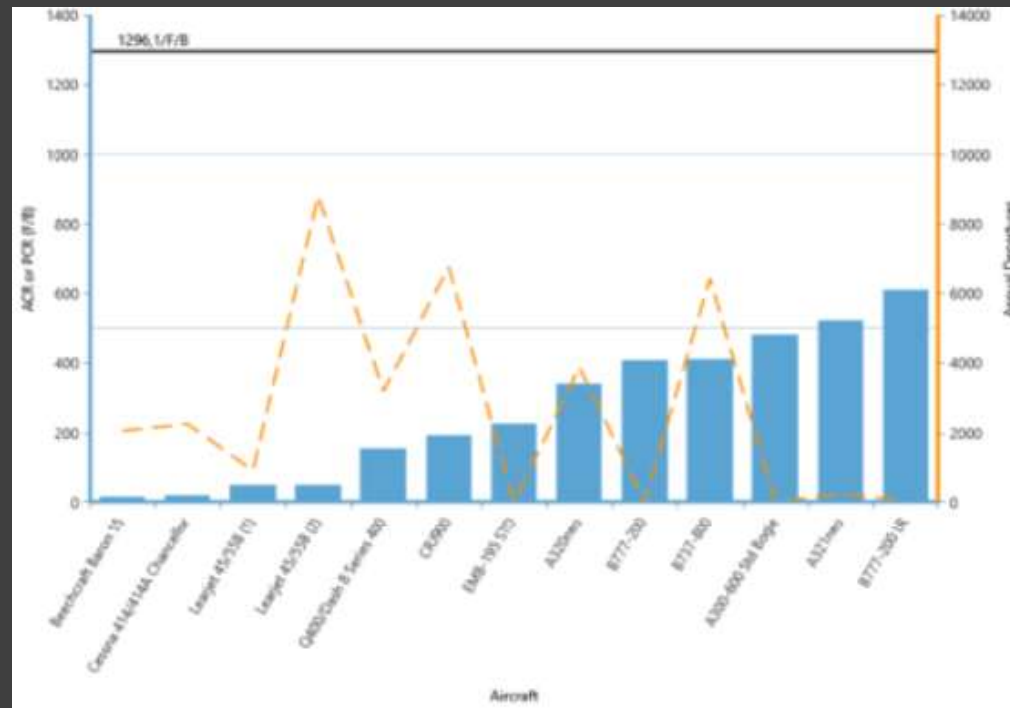
❖ B 777-200LR	758	F/C	(MTOW)
❖ B737- 800	448	F/C	(MTOW)
❖ A 321neo	574	F/C	(MTOW)





Eksempel Runway, Asfalt

PCR verdi: **1.296** F/C/X/T





Eksempel, Standplads, Betong

PCR verdi: 621 R/A/W/T (Beregnet med FAA's software: Faarfield 2.1.1)

- R : Rigid (Betong belægning)
- A : Underbund type A (≥ 150 MPa)
- W: Dæktrk ($\geq 1,75$ Mpa)
- T : Teknisk bestemt

ACR verdier:

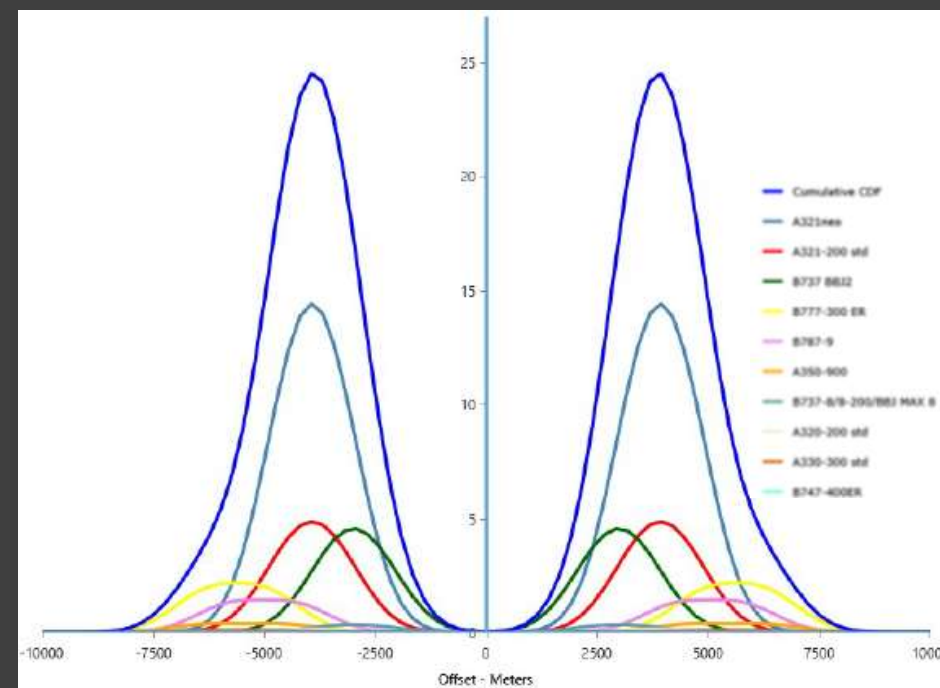
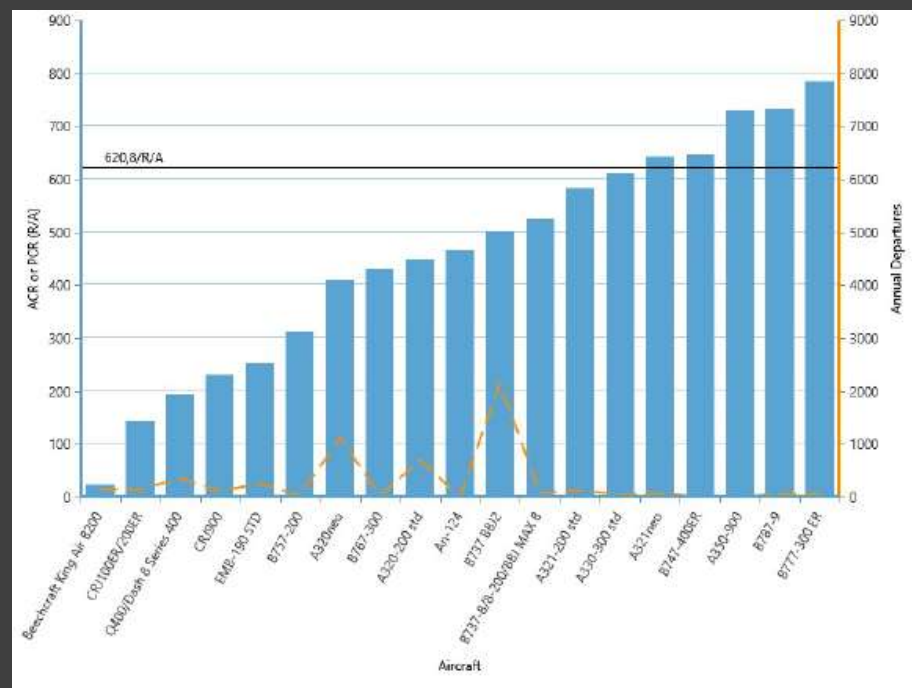
❖ B 777-300ER	784	R/A	(MTOW)
❖ B 747- 400	646	R/A	(MTOW)
❖ A 321neo	643	R/A	(MTOW)





Eksempel, Standplads, Betong

PCR verdi: 621 R/A/W/T



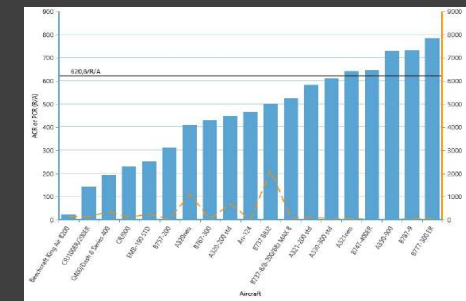


Damage Factor for betong-belægninger skal i Faarfield beregningerne også indeholde:

- Betongens bøye-træk-styrke (Flexural strength)
 - Den kan ikke umiddelbart måles
 - Beregning pga. betonens E-modul eller trykstyrke: stor usikkerhed

Betongens E-modul kendes ikke (Faarfield har fastsat et E-modul på 27.579 MPa)
Beregne E-modulet pga. HWD målingernes defleksionsbassin med LEA: stor usikkerhed

Bøye-træk-styrken er i denne beregning fastsat empirisk til
5,2 MPa
(Vurderet usikkerhed +/- 0,5 MPa)



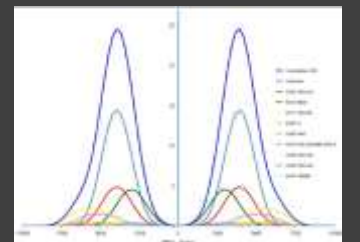


Hvordan få dette problem PCR for betong-belægninger løst?

- De gamle PCN-værdier for betong-belægninger var lette at beregne med Westergaards formler
- Der var bøye-træk-styrke ikke nødvendig

Det lykkedes til sidst at finde frem til en beregnings-procedure:

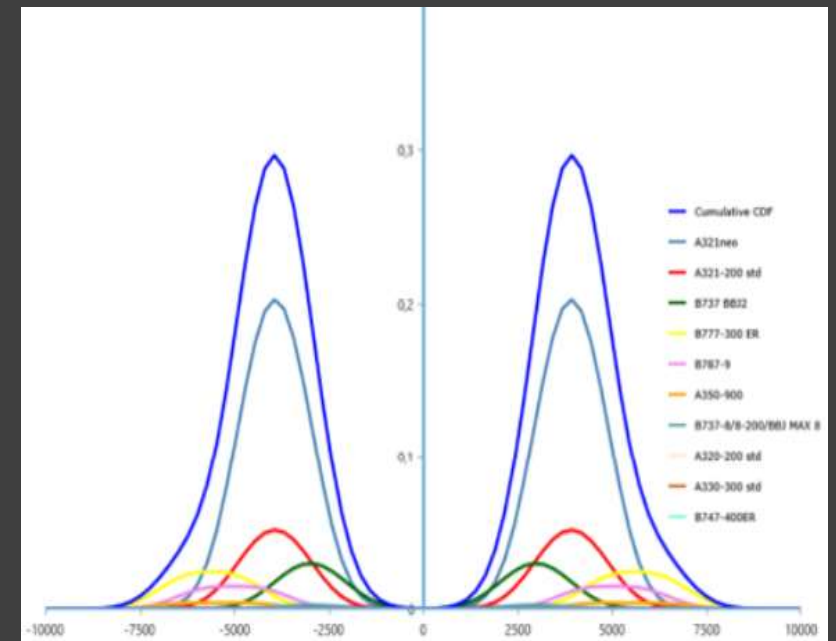
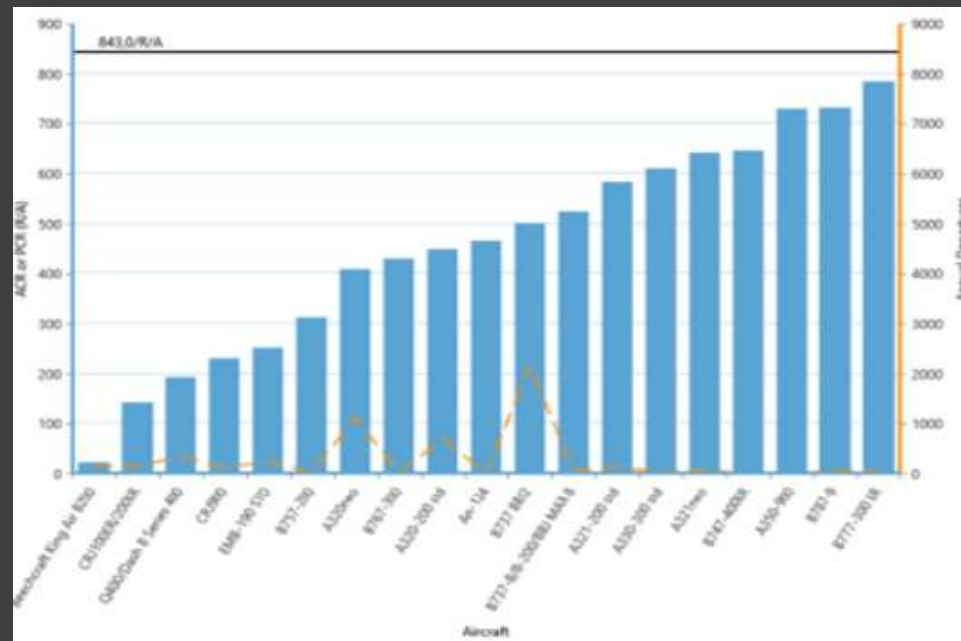
- ☐ Bestem levetiden af en given beton-belægning med Westergaards formler
Her indgår også bøye-træk-styrken (anvender 5,2 MPa)
- ☐ Bestem Faarfield's bøye-træk-styrke iterativt med Faarfield programmet
 - Forudsat samme betong-belægning
 - Forudsat samme belastning
 - Forudsat samme levetid





Ny beregning, Samme standplads, Betong

- ✓ Iterativt beregnet Faarfield-bøye-træk-styrke: 6,1 MPa (urealistisk)
- ✓ Ny PCR verdi: 850 R/A/W/T





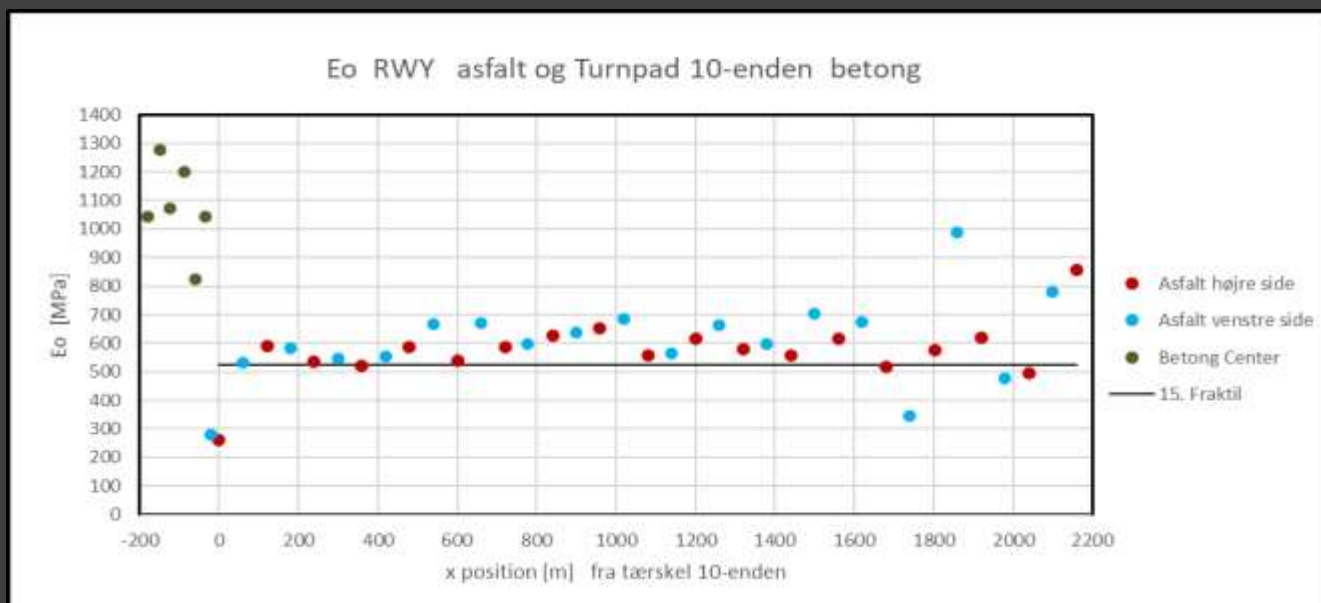
Lufthavn, Runway xx -yy, Asfalt

Overflade E-modulet målt med faldloddet:

$$E_o = 2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot r \cdot p / d \quad [\text{MPa}]$$

Overflade E-modulet er et indirekte udtryk for bæreevnen

PCR værdien tilstræbes beregnet ved målingernes 15%-fraktil niveau



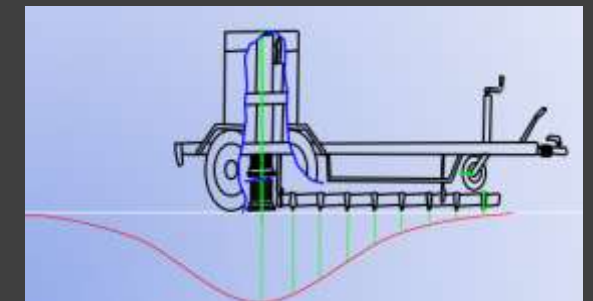
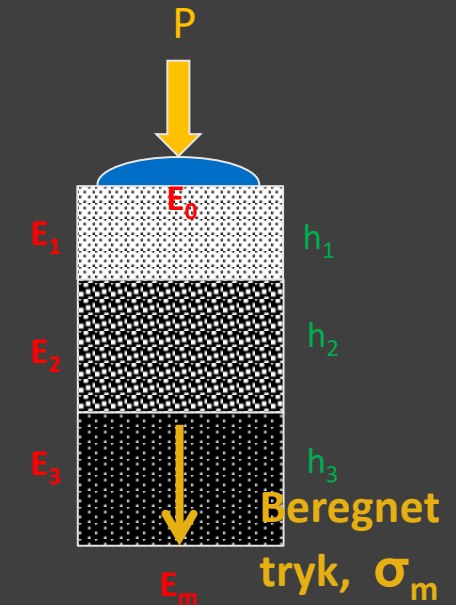


PCR beregningen kræver input af lagenes E-moduler

Lagenes E-moduler beregnes ved back-calculation af Defleksionsbassinet når Lagtykkelserne kendes.

PCR verdien beregnes med Faarfield med input af

- Lagtykkelser
- E-moduler
- Fly-trafik (MTOW)
- Design-periode (20 år er anbefalet af Faarfield)

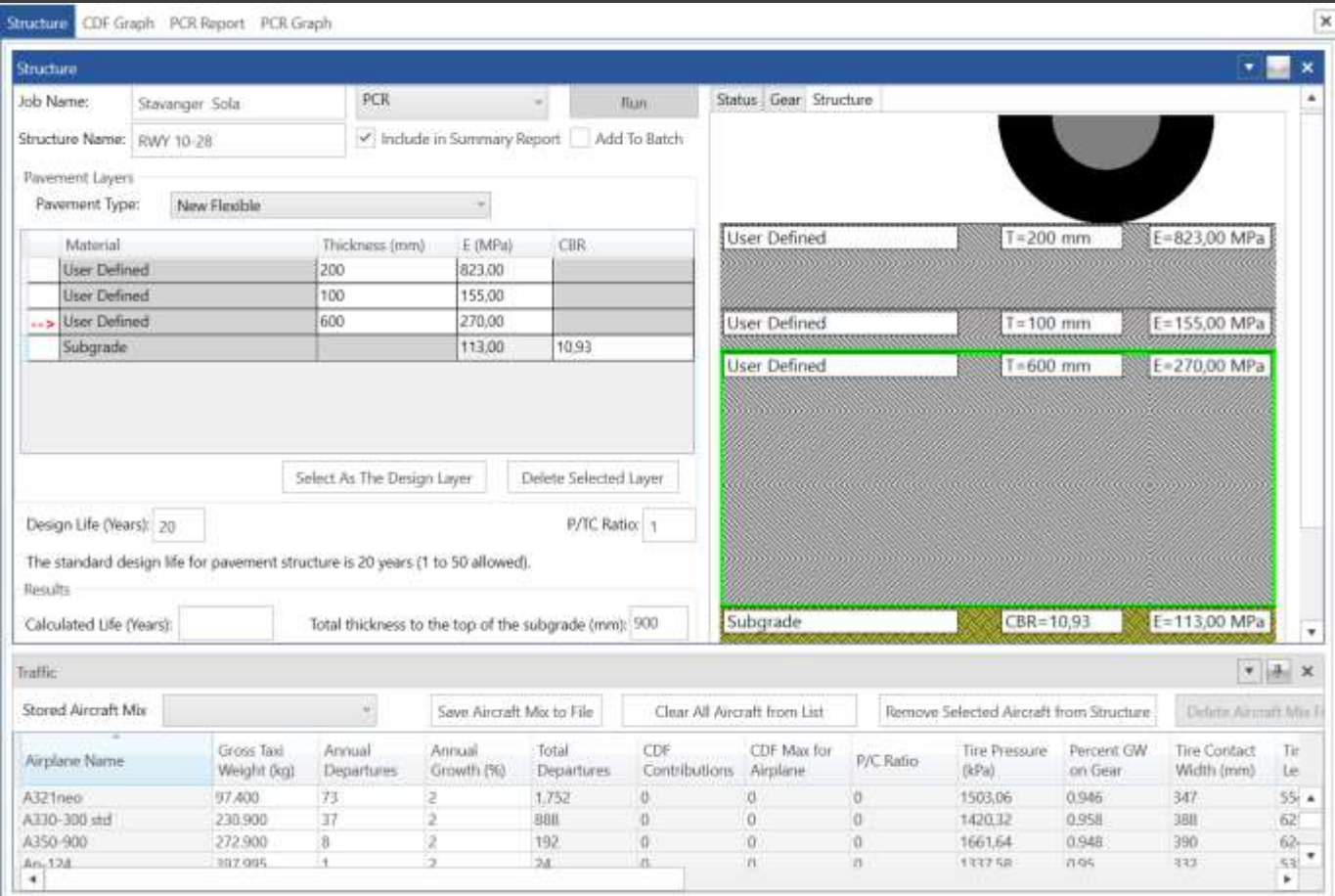




Faarfield Calculation PCR verdi

Design-kriteriet for Asfalt er alene resulterende tryk / strain på Underbunden

Design-kriteriet for Betong er alene resulterende træk i Betong – lagets underside

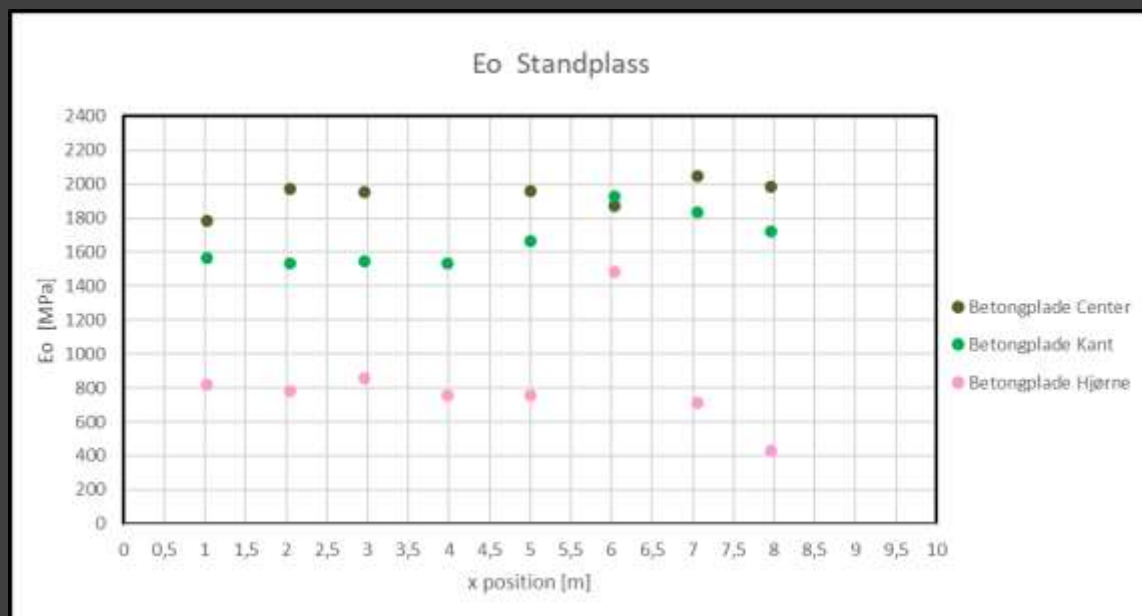




Tilbage til Standplads, Betong Overflade E-modulet målt med faldloddet:

- Center målinger: PCR værdien beregnes ved målingernes 15%-fraktil niveau
- Kant målinger: Load Transfer
- Hjørne målinger: Load Transfer

$$E_o = 2 \cdot (1 - v^2) \cdot r \cdot p / d \quad [\text{MPa}]$$





Load Transfer:

Forholdet mellom defleksionerne på hver side hver side af betong-samlingen

- Der belastes med geofon ved kanten / hjørnet
 - Der måles med en geofon på hver side af betong-samlingen
- Load Transfer, LT: Forholdet mellem defleksionerne på hver side
 - Load Transfer Efficiency, LTE: 1 minus forholdet mellem den målte defleksions-difference og den defleksions difference der ville være uden kraftoverførsel



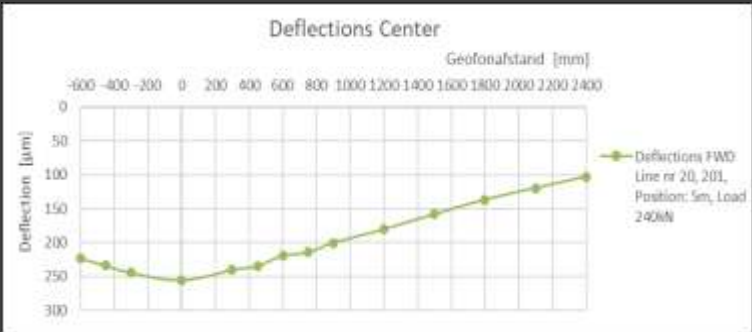
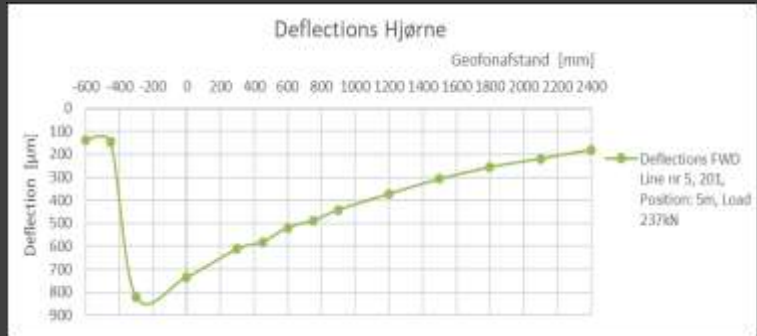


Anden Standplads, Betong

Er der altid gode Load Transfers ved beton-kanterne?

Standplads Betong Trafik tabel 4.1															
PCR 20 år [tal-kode]	PCR [bogstav-kode]	E0	E1	E1 korr.	E2	E3	Esub	k	Dybde fast grund	Restle-tetid	Forstærk-ning	Kant Load Transfer LT	Kant Load Transfer LTE	Hjørne Load Transfer	B777-300ER ACR
-	-	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MN/m3	m	år	mm	%	-	%	-
840	R/A/W/T	2029	27579	27579	274	274	274	99	-	20	0	31	0.48	32	784

Load Transfers der rapporteres i skemaet er 15% fraktilen af de beregnede verdier
Der er målt Load transfers ned til 18% (hvilket også er rapporteret særskilt)



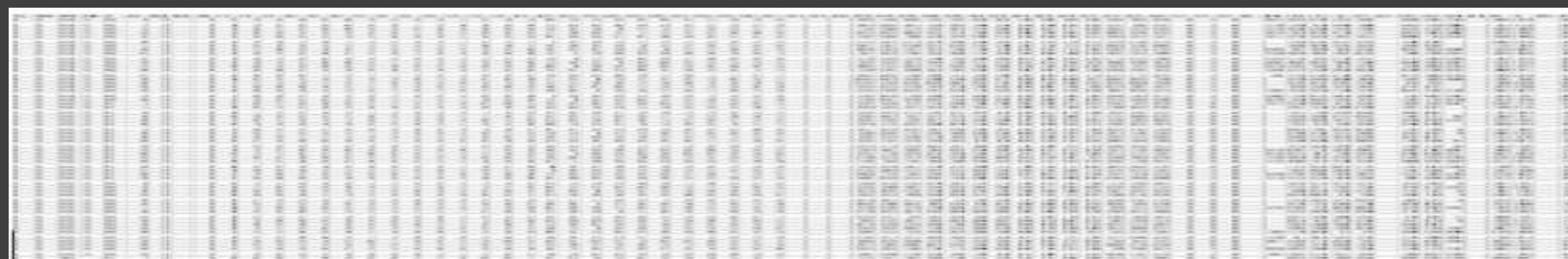
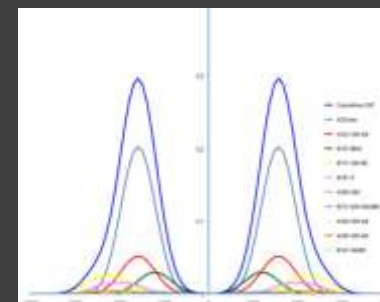
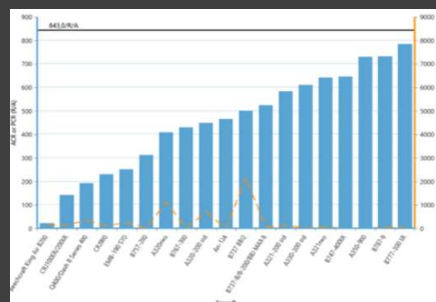
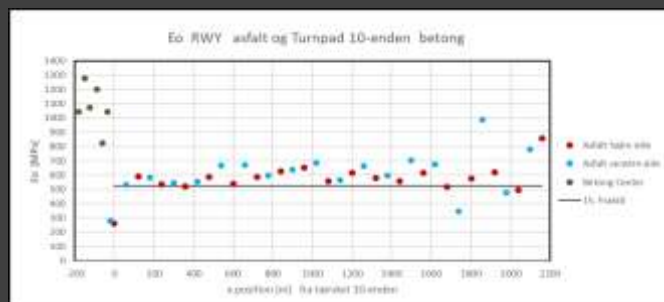


Hvad bliver så rapporteret:

	RWY 10-28 St 20 - 2160 Asfalt Trafik tabel 4.1											
PCR 20 år [tal- kode]	PCR [bogsta- v-kode]	E0	E1	E1 korr.	E2	E3	Esub	CBR	Dybde fast grund	Restle- vetid	Forstær- kning	B777- 200LR ACR
-	-	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	-	m	år	mm	-
1.300	F/B/X/T	533	1797	823	155	270	113	9	-	20	0	612

For Betong belægninger
også de beregnede

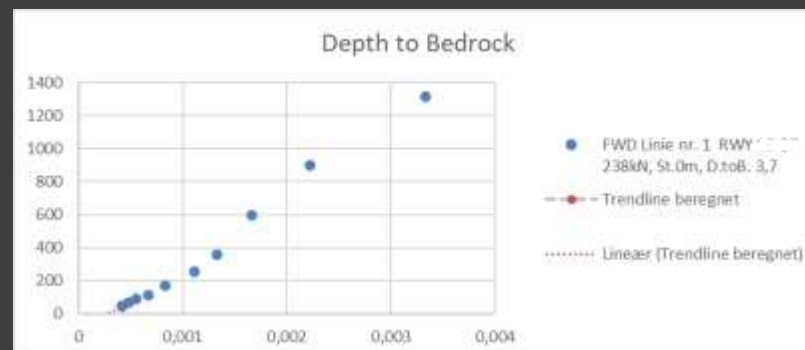
- PCN-verdier
- Kant og Hjørne Load transfer





Dybde til "fast grund" ("Bedrock")! Målinger fra lufthavn

- Hvor defleksionerne målt i afstand nærmer sig 0 er der sandsynligvis Bedrock.
- Ved afbildning af defleksionerne som funktion af de inverse afstande til geofonerne findes dybden til Bedrock.
- Dybden til bedrock er her beregnet til 3,7m.
- Anvendelse af Bedrock i Back-calkulationen giver mere realistiske E-værdier.
- Forward-calculationer som Faarfield og af dimensionerings software kan normalt ikke håndtere Bedrock.
- Derfor må back-calkulationen udføres, så der beregnes anvendelige vikarierende E-moduler.





Harmonisering

- **Ved PCN beregningerne bliver PCN-verdien beregnet i hvert målepunkt i en sektion.**

Det medfører tit PCN værdier med forskellige underbunds kategorier (type A, B, C D) i de forskellige målepunkter

En homogen sektion har brug for 1 PCN værdi med 1 type underbund kategori for at kunne rapporteres

Det kræver harmonisering af PCN verdierne til samme type underbund

- **Ved disse PCR beregninger beregnes E værdier der er 15% fraktil af målingerne i den homogene sektion**

Det eliminerer problemet med homogenisering til samme underbund





PCR rapportering

PCR Resultaterne samles i et
oversigts skema

Strækning	Placering	Belægning	PCR Beregnet		PCR omregnet til samme type underbund		PCR AIP-rapport forslag	
			Talkode	Bogstav kode	Talkode	Bogstav kode	Talkode	Bogstav kode
-	-	-	-	-	-	-	-	-
RWY 18-36	-	Asfalt	2.240	F/C/X/T	1.808	F/B/X/T	800	F/B/X/T
RWY 10-20	St. 20 - 2160	Asfalt	1.300	F/B/X/T	1.300	F/B/X/T	800	F/B/X/T
RWY 10-20	St 0	Asfalt	1.850	F/B/X/T	1.850	F/B/X/T	800	F/B/X/T
RWY 10-20	Turnpad 10-ende	Betong	1.040	R/C/W/T	886	R/B/W/T	886	R/B/W/T
TWY A1	-	Asfalt	1.380	F/C/X/T	1.114	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY C3	Belægningssten st. 300 - 323 m	Asfalt / Sten	1.410	F/C/X/T	1.307	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY D	-	Asfalt	11.350	F/A/X/T	12.345	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY E1	-	Asfalt	4.630	F/C/X/T	3.738	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY E2	-	Belægningssten	4.030	F/A/X/T	4.383	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY G1	-	Asfalt	2.860	F/A/X/T	3.111	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY G2	-	Asfalt	2.530	F/A/X/T	2.752	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY G3	-	Asfalt	2.500	F/B/X/T	2.719	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY G4	-	Asfalt	7.280	F/A/X/T	7.918	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY G5	-	Asfalt	5.430	F/A/X/T	5.906	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY G6	-	Asfalt	6.840	F/A/X/T	7.440	F/B/X/T	800	F/B/X/T
TWY G7	-	Asfalt	10.860	F/A/X/T	11.812	F/B/X/T	800	F/B/X/T

- "PCR Beregnet" er de beregnede PCR verdier hver sektion
- "PCR omregnet til samme type underbund"
Omregnes vha. ACR værdierne for sektionens kritiske fly der svarer til en CDF belastning (beregnet af Faarfield)
- "PCR AIP-rapport forslag"
Faarfield anbefaler at de rapporterede PCR værdier højest er 25% over ACR verdien for det tungeste fly





ICAO's AIP

Sådan kan IAP f.eks. Se ud

AIP'en har piloter og
alle andre adgang til

I AIP'en står de
PCR / PCN (markert med gult) verdier
der er indrapporteret af
Lufthavnsmyndighederne



RWY	BRG (GEO)	THRESHOLD		BEARING STRENGTH	DECLARED DISTANCES				TWY AND APRON
					TORA	ASDA	TODA	LOA	
02	024.78	655710.17N	0122751.90 E	PCN-15/F/A/X/U	1199	1199	1414	1199	ALL TWY: WD 18M ASPH PCN-15/F/A/X/U APRON: ASPH PCN-15/F/A/X/U ELEV 57 FT.
20	204.79	855748.28N	0122835.03 E	PCN-15/F/A/X/U	1199	1188	1516	1188	



Sammenfatning

- ICAO er ved at ændre ACN-PCN systemet til et ACR-PCR system
- PCR-verdien giver en “snapshot” verdi af flyplass-belægningernes bæreevne.
- PCR-verdien for belægningerne skal være større end ACR-verdien for det aktuelle fly.
- PCR beregningerne af Belægningernes bæreevner skal også indeholde belastningen fra den samlede flytrafik
- Flytrafikkens belastning beregnes med en “CDF” verdi (Cumulated Damage Factor)
- Med Faldlodsmåler (HWD) beregnes belægningernes E-moduler
- Faldlodsmåleren skal være en HWD (Heavy Weight Deflectometer) for at matche fly-hjulenes belastninger (nonlinearitet)
- PCR beregnes med Faarfield 2.1.1 software frigivet af FAA (Federal Aviation Administration i USA)
- Betong-belægningers PCR Verdi kræver beregning af belægningernes restlevetid med et betong-belægnings værktøj
- PCR-verdien beregnes på grundlag af ICAO's og FAA's retningslinier.
- PCR beregningerne afventer EASA's europæiske godkendelse før det kan afløse ACN-PCN systemet



Spørsmål