

Grænsen for planters tilpasningsevne under klimaforandringer

Projekt forskerspirer 2025



Projekt Forskerspirer 2025	
Titel	Grænsen for planters tilpasningsevne under klimaforandringer
Identifikationskode	BG033
Navn	Lukaz Rosenweis Wullenweber
Gymnasium	Gammel Hellerup Gymnasium
Fagområde	NAT

Indholdsfortegnelse

Indledning.....	3
Problemformulering og Formål.....	4
Afgrænsning.....	4
Teori.....	6
Varme- og tørkestress	6
Byg (<i>RGT Planet</i>)	6
Metode og Design.....	7
Dyrkning og Klimakamre.....	7
Fitness og Hukommelse	8
RT-qPCR.....	8
Projektets udførelse	9
Budget	10
Konklusion og Perspektivering.....	11
Tak.....	11
Bibliografi.....	12
Bilag 1 - $\Delta\Delta C_t$ -metoden	13

Indledning

I en verden hvor vi hver dag hører mere og mere om klimaforandringer, hvordan temperaturen stiger og ozonlaget nedbrydes, har fokus ofte været på de økonomiske omkostninger, ekstreme vejrforhold og naturkatastrofer samt tabet af biodiversitet. Men hvordan kommer vores afgrøder til at klare fremtidens klimaforandring?

Klimaforandringerne er en af de største udfordringer for menneskeheden og alt liv på jorden. Danmarks gennemsnitstemperatur er allerede steget med omkring $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹ og forventes at stige yderligere med op til $3.5\text{--}4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ inden år 2100², afhængigt af hvor effektivt vi reducerer CO₂-udledningen. Denne udvikling har allerede ført til mere ekstreme vejrforhold, ændrede nedbørsmønstre og længere varmeperioder, der alle har direkte konsekvenser for plantevækst og landbrugsproduktion.

Når planter udsættes for varme- og tørkestress, påvirkes deres fysiologi og genetik. Fotosyntese hæmmes og respiration, hormonbalance og proteinsyntese forstyrres³. Som resultat sker der et fald i energiproduktion og biologisk fitness hvilket medfører lavere udbytte, hæmmet vækst og i sidste ende celledød.

Heldigvis ved vi, at planter kan tilpasse sig gradvise ændringer i deres omgivelser. Gennem genetiske og epigenetiske mekanismer kan de udvikle en form for "stresshukommelse", der hjælper dem med at klare fremtidige udfordringer, ved at "huske" tidligere stress og videregive denne til næste generation. Men i takt med at klimaforandringerne accelererer er det mere og mere usikkert om planterne kan følge med.

¹ I forhold til referenceperioden 1981-2010 (DMI, 2024))

² (DMI, 2024) og (WGI, 2021)

³ (Qiang, et al., 2024)

Problemformulering og Formål

På baggrund af overstående rejser det spørgsmålet:

Hvordan påvirker fremtidens klimaforandringer danske afgrøders genetik og fysiologi og findes der en grænse for deres tilpasningsevne under de løbende mere ekstreme klimaforhold.

Jeg vil undersøge vårbyg der er klassisk for det danske landbrug og udsætte den for et fremtidigt dansk klimascenarie, baseret på DMI's og IPCC's klimaprojektioner. Ved at øge temperatur og reducere nedbør i kontrollerede intervaller vil jeg undersøge, hvordan afgrøden reagerer genetisk og fysiologisk – og hvordan disse ændringer udvikler sig over flere generationer.

Formålet er at undersøge hvordan afgrøden påvirkes af stressfaktorerne og om der kan identificeres et punkt, hvor belastningen overstiger plantens tilpasningsevne og selv genetisk (eller epigenetisk) "stresshukommelse" ikke længere er nok til at kompensere. Jeg vil analysere, hvordan varme- og tørkestress påvirker afgrødens vækst, udbytte og genetisk stabilitet, og om efterfølgende generationer klarer sig bedre, dårligere eller lige så godt som forældregenerationen.

Ved at sammenligne resultaterne mellem generationerne vil jeg forsøge at finde den biologiske grænse, og måske endda en konkret tærskel, for plantens tilpasningsevne under realistiske danske klimascenarier. Derved kan projektet bl.a. anvendes til vurdering af danske afgrøders sårbarhed over for fremtidens klimaændringer.

Afgrænsning

Jeg har først og fremmest valgt at afgrænse mit projekt til undersøgelsen af én enkelt afgrøde, vårbyg (specifikt *RGT Planet*), som er en af de mest udbredte og økonomisk betydningsfulde kornsorter i Danmark. Byg har en relativt kort generationstid⁴, hvilket gør det muligt at undersøge ændringer over flere generationer inden for projektets tidsramme. Samtidig er byg kendt for en vis varme- og tørketolerance, så hvis selv en robust afgrøde som byg udfordres stærkt, peger det på en bredere problematik for dansk landbrug. Resultaterne vil desuden kunne generaliseres til andre kornsorter som hvede, rug og havre, der har lignende træk.

Geografisk er projektet afgrænset til Herning Kommune i Midtjylland. Området repræsenterer et typisk dansk landbrugs- og byområde med varierende jordbundstyper og stigende temperatur- og tørketrend ifølge DMI's data. Denne placering gør det muligt at basere forsøget på realistiske danske klimaprojektioner og samtidig fokusere på forhold, der har direkte relevans for dansk fødevarerproduktion. Jeg vil også anvende data fra DMI's SSP5-8.5/RCP8.5 og IPCC's CMIP6, da jeg vil kigge på et ekstremt men realistisk scenarie.

⁴ 90-100 dage (Bongard, Erv, & Steve, 2021)

Klimamæssigt fokuserer projektet udelukkende på to stressfaktorer:

1. Varmestress
2. Tørkestress

Andre faktorer, som ændrede CO₂-niveauer, næringsstofbalance eller UV-intensitet, inddrages ikke. Dette valg er truffet for at isolere effekten af de to faktorer, der ifølge både DMI og IPCC forventes at have størst betydning for danske afgrøders vækst i de kommende årtier.⁵

Projektet afgrænses desuden til tre forsøg:

- Et kontrolforsøg, der repræsenterer nutidens danske klima.
- Et scenarie baseret på DMI's og IPCC's fremskrivninger for 2041–2070.
- Et scenarie baseret på fremskrivninger for 2071–2100.

Alle scenarier tager udgangspunkt i indikatorerne: Temperatur, nedbør og tørke i vækstsæsonen (forårs- og sommermånederne).

Forsøget omfatter to generationer af byg (F_0 - F_1), eventuelt en tredje (F_2), under kontrollerede forhold, for at kunne observere, om og hvordan klimastress påvirker både den enkelte generation og efterfølgende tilpasninger. Det betyder, at resultaterne primært kan sige noget om kort- og mellemlang tilpasning.

Jeg har bevidst fravalgt at undersøge flere plantearter eller yderligere stressfaktorer, så det er muligt at gennemføre dette projekt inden for Forskerspireprogrammets rammer og økonomi.

⁵ (WGII, 2022) og (DMI, DMI - Alvorlig tørke på vej?, 2025)

Teori

Varme- og tørkestress

Varme- og tørkestress er to af de mest betydningsfulde klimafaktorer, der påvirker planter vækst, udbytte og genetiske stabilitet. Når temperatur og vandbalance afviger fra plantens optimale niveau, forstyrres en række centrale fysiologiske processer som fotosyntese, respiration og proteinsyntese⁶.

Ved varmestress reagerer planter både på kort og lang sigt. Akut varme (> 30 °C) fører til denaturering af proteiner, skade på cellemembraner og reduceret fotosyntetisk aktivitet. For at modvirke dette aktiveres varmechokfaktorer (HSF'er), som stimulerer produktionen af varmechokproteiner (HSP'er), der stabiliserer og reparerer beskadigede proteiner⁷.

Planter længerevarende varmetolerance skyldes dog ikke kun disse proteiner, men også epigenetiske ændringer. Varme kan ændre DNA-methylering, histonmodifikationer (f.eks. H3K4me3, H3K27me3) og RNA-modifikationer, som påvirker genekspressionen af HSP- og HSFA-gener⁸. Dette skaber en "varmestresshukommelse", hvor planten reagerer hurtigere og mere effektivt på efterfølgende varmepåvirkninger.

Nogle af disse ændringer kan endda videreføres til næste generation, hvilket kaldes transgenerationel stresshukommelse⁹.

Tørkestress har lignende konsekvenser, men skyldes primært et lavt vandindhold i jorden, hvilket hæmmer vandoptagelsen og medfører cellulær dehydrering. Planter reducerer transpiration ved at lukke spalteåbningerne, hvilket mindsker CO₂-optag og dermed fotosynteseeffektivitet. Samtidig øges produktionen af abscisinsyre (ABA), som aktiverer gener for dehydriner (DHN) og DREB-transkriptionsfaktorer, der beskytter cellerne mod udtørring og ophobning af reaktive iltarter (ROS)¹⁰.

Byg (*RGT Planet*)

RGT Planet er en to-række vårbygsort (*Hordeum vulgare* L.) udviklet til høj udbytteevne og god maltkvalitet. Sorten er blandt de mest udbredte i Danmark og Nordeuropa og anvendes både til foder og brygning af øl. Den er kendetegnet ved god sygdomsresistens, høj stabilitet og en semi-opret vækstform i de tidlige udviklingsfaser (5–9-bladstadiet), hvilket gør den velegnet til forsøg under kontrollerede forhold¹¹.

Byg er generelt en robust plante, men dens produktivitet afhænger stærkt af klimaet under vækstsæsonen. Temperaturen og vandtilgængeligheden er afgørende for vækst, blomstring og

⁶ (Lawlor & Tezar, 2009) og (Qiang, et al., 2024)

⁷ (Perrella, Bäurle, & van Zanten, 2022)

⁸ (Perrella, Bäurle, & van Zanten, 2022) og (Qiang, et al., 2024)

⁹ (Qiang, et al., 2024)

¹⁰ (Hossain, Burritt, & Fujita, 2016)

¹¹ (Agrii, 2025)

frøsætning. Under optimale danske forhold¹² forløber væksten stabilt, men ved langvarig varme (> 28–30 °C) eller tørke reduceres fotosyntese, cellevækst og enzymaktivitet markant. Dette påvirker især reproduktionsfasen, hvor akسدannelse og kernefyldning er meget følsomme for stress¹³.

I byg skylder varme- og tørkestress ændringer i både fysiologi og genekspression. Ved varmeaktivering øges produktionen af varmechokproteiner, som stabiliserer andre proteiner og beskytter cellestrukturer som nævnt tidligere. HSP-generne *HvHSP70* og *HvHSPA2* aktiveres typisk. Under tørkestress udløses syntese af abscisinsyre (ABA), som styrer stomatalukning og aktiverer tørkerelaterede gener som *HvDREB2A*, *HvDHN1* og medlemmer af NAC- og AP2-familierne, der også beskytter mod vandtab¹⁴.

Disse responser hænger sammen med bygs fysiologiske tilstand. Varme- og tørkestress fører til øget produktion af reaktive iltarter (ROS), som kan skade DNA og cellemembraner¹⁵. Byg reagerer derfor med antioxidative enzymer som superoxid-dismutase (SOD) og katalase (CAT), der hjælper med at bevare cellestabilitet og forhindre oxidativt stress.¹⁶

Metode og Design

Som sagt vil jeg i mit projekt undersøge vårbyg-sorten *RGT Planet* under kontrollerede forhold. Forsøget er designet til at efterligne realistiske danske klimaforhold i nutiden og to fremtidige scenarier. Da vårbyg normalt sås i april/maj og høstes i juli/august¹⁷, vil den første del af vækstperioden i forsøget være baseret på DMI's data for forår, mens den senere del vil være for sommer. På den måde kan jeg simulere hele vækstsæsonen.

Forsøget gennemføres over to generationer. Først dyrkes en generation under de tre forskellige klimaforhold hvorefter planterne analyseres (med RT-qPCR for stressrelateret genaktivitet og fitness-analyser for fysiologien). Frøene fra hver gruppe samles og anvendes til en ny generation, som dyrkes under de samme betingelser for at undersøge eventuelle arvelige eller transgenerationelle effekter.

Dyrkning og Klimakamre

Planterne dyrkes i kontrollerede klimakamre for præcist at kunne simulere nutidige og fremtidige danske klimaforhold. Forsøget forventes gennemført ved Institut for Plante- og Miljøvidenskab (PLEN) på Københavns Universitet, som råder over klimakamre med styring af temperatur, lys og luftfugtighed. Hvis adgang til disse ikke er mulig, kan forsøget udføres i mindre vækstbokse med

¹² Dagtemperaturer omkring 20–22 °C og tilstrækkelig fugtighed

¹³ (Lawlor & Tezar, 2009) og (Collin, et al., 2025)

¹⁴ (Hossain, Burritt, & Fujita, 2016) og (Collin, et al., 2025)

¹⁵ (Lv, Li, Chen, Rui, & Wang, 2023)

¹⁶ (Huseynova, Nasrullayeva, Rustamova, Aliyeva, & Aliyev, 2014)

¹⁷ Information fra tidligere landmand Elisabeth Ejlekær Nielsen

manuelt reguleret varme og vandtilførsel, så forholdene stadig svarer til de opstillede klimascenarier.

Der anvendes tre kamre med stigende klimabelastning:¹⁸

1. Kontrol: nutidige danske forhold (dag/nat 22 °C/14 °C, 80 % feltkapacitet).
2. 2041–2070-scenarie: dag/nat 26 °C/15 °C, 55–60 % feltkapacitet, hedebølgepulser på 28–30 °C i 5–6 døgn.
3. 2071–2100-scenarie: dag/nat 28 °C/18 °C, 30–40 % ↔ 80 % feltkapacitet, hedebølger på 32–34 °C hver 7.–10. dag.

Jorden består af sandblandet lerjord, som svarer til de typiske forhold i Herning Kommune. Alle kamre dyrkes med samme frøparti af *RGT Planet* for at undgå genetisk variation og sikre, at eventuelle forskelle i vækst og stressrespons udelukkende skyldes klimaforholdene.

Valget af klimakamre gør det muligt at kontrollere alle væsentlige parametre og dermed præcist identificere planternes fysiologiske og genetiske reaktioner på varme- og tørkestress. Ulempen er, at klimakamre ikke fuldt ud afspejler naturlige markforhold, hvilket kan begrænse generaliserbarheden.

Fitness og Hukommelse

Planternes fitness vurderes som deres evne til at opretholde vækst og reproduktion under varme- og tørkestress. Jeg måler tre hovedparametre:

1. Biomasse – som samlet indikator for vækst. Et markant fald i biomasse viser reduceret energiproduktion og tilpasningsevne.
2. Fotosyntetisk effektivitet – målt via chlorofylfluorescens. Værdier under 0,75 angiver alvorlig stress og begyndende celledød.
3. Udbytte (antal aks og tusindkornsvægt) – bruges som samlet mål for reproduktiv succes. Et udbyttes tab på over 25 % i forhold til kontrol defineres som kritisk tab af fitness.

I næste generation (F_1) vurderes spireevne og spirehastighed, samt de overstående parametre, for at undersøge, om stresspåvirkningen medfører et brud i plantens genetiske eller epigenetiske tilpasningsevne.

RT-qPCR

For at undersøge, hvordan varme- og tørkestress påvirker genekspressionen i *RGT Planet*, anvendes RT-qPCR (Reverse Transcription quantitative PCR). Metoden gør det muligt at kvantificere mængden af mRNA for specifikke stressrelaterede gener og transkriptionsfaktorer og dermed koble planternes fysiologiske reaktioner til konkrete genetiske ændringer.

¹⁸ Grundet 19+ varmebølgedage i 2041–2070 og 30+ varmebølgedage i 2071–2100, hæves dag/nat temperaturen med et par grader

Prøvetagning: Væv udtages fra flagblade, aks og rødder, da disse dele reagerer forskelligt på stress. Der tages prøver på tre tidspunkter:

1. Før stresspåvirkning (baseline)
2. Under hede- eller tørkepuls (efter ca. 6–12 timer)
3. 24 timer efter stress (recovery)

Prøverne fryses straks i flydende kvælstof og opbevares ved -80°C for at bevare RNA'et intakt. Efterfølgende ekstraheres RNA, omdannes til cDNA, og genekspressionen analyseres med gen-specifikke primere. Data normaliseres mod stabile referencegener som *HvEF1a* og *HvUBC*, og relative ændringer beregnes med $\Delta\Delta\text{Ct}$ -metoden¹⁹.

Jeg fokuserer på gener, der er centrale i byggens stressrespons:

- *Varmerespons*: *HvHSFA2* (transkriptionsfaktor for varmetolerance og hukommelse) og *HvHSP70* (chaperon, beskytter proteiner mod denaturering).
- *Tørkerespons*: *HvDREB2* (tørkeresponsiv transkriptionsfaktor) og *HvDHN1* (dehydrin, beskytter celler mod vandtab).
- *Oxidativ stress*: *HvAPX2* og *HvSOD* (antioxidative enzymer, der modvirker celle- og DNA-skader).
- *Udbytterelaterede gener*: *HvSUS* og *HvAGP-L* (centrale i stivelsessyntese og kernefyldning, som falder ved varmebelastning).

Valget af RT-qPCR skyldes, at metoden er meget præcis og kvantitativ, hvilket gør det muligt at måle selv små ændringer i genaktivitet. Den kan bruges til at sammenligne planternes stressrespons på tværs af klimascenarier og generationer. På den måde kan jeg undersøge, om der sker epigenetisk stresshukommelse.

Ulempen er, at metoden kun undersøger et begrænset antal gener og kræver præcis prøvehåndtering og RNA-kvalitet.

Projektets udførelse

Projektet vil gennemføres i flere faser, der tilsammen dækker både dyrkning, dataindsamling og analyse. Det forventes at strække sig over et år, hvor der dyrkes og analyseres to generationer af vårbyg (*RGT Planet*), eventuelt en tredje, under kontrollerede forhold.

Fase 1 – Forberedelse (måned 1-2)

Klimakamre ved PLEN udvælges og forberedes. Samtidig indsamles klimadata fra DMI's

¹⁹ Se Bilag 1 (Bradburn, u.d.)

Klimaatlas for Herning Kommune. Jordprøver (sandblandet lerjord) klargøres, og frø standardiseres for at minimere variation.

Fase 2 – Første generation (måned 3–6)

Ca. 30 frø sås i tre separate kamre, hvor temperatur og vandindhold justeres i overensstemmelse med de tre klimascenarier. Vækst og biomasse måles ugentligt, og vævsprøver fra blade og aks udtages under blomstring og kernefyldning til RT-qPCR. Efter høst registreres udbytte, tusindkornsvægt og spireprocent, som bruges til at vurdere planternes fitness.

Fase 3 – Anden generation (måned 7–11)

Frø fra F_0 bruges til at dyrke F_1 under samme forhold for at undersøge stresshukommelse og arvelige tilpasninger. Målingerne gentages, og resultaterne sammenlignes mellem generationerne for at identificere eventuelle ændringer i tilpasningsevne.

Fase 4 – Dataanalyse og konklusion (måned 12)

De fysiologiske data sammenholdes med resultater fra RT-qPCR-analyser, hvor ekspressionen af udvalgte stress-relaterede gener kvantificeres. Der vurderes, om ændringer i genaktivitet korrelerer med forbedret eller forringet vækst og udbytte. Resultaterne diskuteres i relation til, hvor hurtigt danske afgrøder som byg realistisk kan tilpasse sig fremtidens klimaforandringer.

Samlet set forventes projektet at tage omkring 12 måneder, hvoraf den eksperimentelle del udgør cirka 9–10 måneder, mens 2–3 måneder bruges på analyse og behandling af data.

Budget

Budgettet beskrives i tabellen under. Obs. nogle materialer/apparaturer forventes at kunne lånes fra KU, eller et institut under KU såsom PLEN.

Tabel 1: En tabel der viser budgettet nødvendigt for at udfører forsøgs-planen

Materiale/udstyr	Antal	Pris i DKK	Kommentar
cDNA reverse transcription kit Købes fra qiagen.com	1 kit/ 50 reaktioner	4000 kr	Til cDNA-syntese fra RNA
RNA-isolation kit Købes fra fishersci.dk	1 kit/ 50 reaktioner	2410 kr	RNA-ekstraktion fra blade, aks og rødder
qPCR-maskine	-	Lånes af KU	
Klimakamre	3	Lånes af KU	
RGT Planet frø Købes fra wynnstay.co.uk	300 stk.	500 kr	Fordi udsæd normalt sælges i landbrugsmængder, vil prisen for denne lille portion sandsynligvis være relativt høj i forhold til antallet.

			Derudover for køb af RGT Planet frø, skal man i kontakt med udbyder.
Jord (Sandblandet lerjord) Købes fra groennehjem.dk	60 L	400 kr	Jorden købes fysisk, hvis blended ikke findes så købes sand og lerjord separat
Plastpotter (3L) Købes fra krukkeshop.dk	30 stk.	105 kr	
qPCR SYBR Green Master Mix Købes fra affigen.com	1 kit	2320 kr	Til RT-qPCR-reaktioner
Primere Købes fra eu.idtdna.com	10 sæt	1250 kr	Generne nævnt i RT-qPCR. (et sæt refererer til to oligos, et primerpar)
Referencegener (HvEF1α, HvUBC)	-	-	Inkluderet under "Primere" da jeg undersøger 8 gener + 2 referencer
Laboratorieudstyr og Kemikaler	-	Lånes/gives af KU	
Klorofylfluorometer (Fv/Fm)	-	Lånes af KU	Måling af fotosyntetisk effektivitet
Tørreskab / vægt til biomasse	-	Lånes af KU	Bruges til tørstofanalyse
Software til dataanalyse (GraphPad Prism / Excel)	-	Gratis/licens via KU	Bruges til $\Delta\Delta C_t$ og statistik
Uforudsete omkostninger	-	-	Hvis Klimakamre ikke kan lånes af KU er der tilstrækkelig økonomi, til at holde mig inden for 20.000 og bygge kamrene selv.
I alt		10.985 kr	
Rest		9.015 kr	

Konklusion og Perspektivering

Undersøgelsen skal ikke bevise, at der findes en fast grænse for planters tilpasningsevne, men i stedet belyse, hvordan planternes fitness gradvist reduceres, når klimabelastningen øges. På baggrund af resultaterne kan der dog muligvis opstå en sådan grænse.

Projektet forventes at give ny indsigt i, hvordan danske afgrøder reagerer genetisk og fysiologisk på fremtidens klima, og dermed bidrage til vurderingen af landbrugets sårbarhed. Resultaterne kan bruges til at forudsige og forebygge udbyttetab, identificere robuste sorter og støtte udviklingen af klimatilpassede dyrkningsstrategier.

På længere sigt kan data fra dette projekt danne et stærkt grundlag for videre forskning i andre afgrøder, hvor man kan inddrage flere klimafaktorer og biologiske parametre. En sådan udvidelse vil kunne bidrage til en mere omfattende forståelse af planters tilpasning under et hastigt forandrende klima.

Tak

Jeg vil til sidst gerne sige tusinde tak til min forskerkontakt Nanna Koschmieder Jørgensen, (cand.scient, ph.d., lektor i biologi, Gl. Hellerup Gymnasium) for vejledning og sparring.

Derudover også en speciel tak til Elisabeth Ejlekær Nielsen (tidligere landmand) for vejledning på baggrund af afgrøde valg.

Samt et stort tak til min koordinator Kasper Laust og mine med-forskerspirere, venner og familie.

Bibliografi

Agrii. (24. April 2025). *Agrii UK*. Hentet fra RGT Planet Variety Profile: <https://www.agrii.co.uk/your-crops/cereals/spring-barley/rgt-planet/>

Bongard, P., Erv, O., & Steve, S. (2021). *University of Minnesota Extension*. Hentet fra Spring barley growth and development guide: <https://extension.umn.edu/growing-small-grains/spring-barley-growth-and-development-guide#growth-timeline-and-process-791511>

Bradburn, S. (u.d.). *TTB*. Hentet fra How To Perform The Delta-Delta Ct Method: <https://toptipbio.com/delta-delta-ct-pcr/>

ChatGPT. (u.d.). *Anvendt til at finde artikler omkring emnet, og lave research omkring teori og metoder*. Hentet fra chatgpt.com

Collin, A., Matkowski, H., Sybilska, E., Biantari, A., Król, O., & Daszkowska-Golec, A. (8. April 2025). *BMC Plant Biology*. Hentet fra ABA-induced alternative splicing drives transcriptomic

reprogramming for drought tolerance in barley:

<https://bmcplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-025-06485-y>

DMI. (2024). *DMI*. Hentet fra Klimaatlas Data og Produkter: <https://www.dmi.dk/klima-atlas/data-og-rapporter-klimaatlas>

DMI. (7. maj 2025). *DMI - Alvorlig tørke på vej?* Hentet fra <https://www.dmi.dk/nyheder/alvorlig-toerke-paa-vej>

Hossain, M. A., Burritt, D. J., & Fujita, M. (8. Januar 2016). *Wiley Online Library*. Hentet fra Cross-Stress Tolerance in Plants: Molecular Mechanisms and Possible Involvement of Reactive Oxygen Species and Methylglyoxal Detoxification Systems: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527694570.ch16>

Huseynova, I. M., Nasrullayeva, M. Y., Rustamova, S. M., Aliyeva, D. R., & Aliyev, J. A. (Oktober 2014). *Scientific Research*. Hentet fra Differential Responses of Antioxidative System to Soil Water Shortage in Barley (*Hordeum vulgare* L.) Genotypes: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=50289>

Jacott, C. N. (16. juli 2020). *Oxford Academic, Journal of Experimental Botany*. Hentet fra Feeling the heat: developmental and molecular responses of wheat and barley to high ambient temperatures: <https://academic.oup.com/jxb/article/71/19/5740/5872015>

Lawlor, D. W., & Tezar, W. (19. januar 2009). *Annals of botany, oxford journals*. Hentet fra Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity (s. 561-579): <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2707350/pdf/mcn244.pdf>

Lv, X., Li, Y., Chen, R., Rui, M., & Wang, Y. (23. Marts 2023). *PMC, National Library of Medicine*. Hentet fra Stomatal Responses of Two Drought-Tolerant Barley Varieties with Different ROS Regulation Strategies under Drought Conditions: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10135251/>

Mahalingam, R. (8. December 2022). *Frontiers in Plant Science*. Hentet fra Heat and drought induced transcriptomic changes in barley varieties with contrasting stress response phenotypes: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.1066421/full>

Perrella, G., Bäurle, I., & van Zanten, M. (17. januar 2022). *New Phytologist*. Hentet fra Epigenetisk regulering af termomorfogenese og varmestresstolerance: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.17970>

Qiang, J., Muzaffaruddin, C., Aamir, A., Zaid, C., Pingxian, Z., Adeel, R., . . . Sadaruddin, C. (2024). *MDPI*. Hentet fra Epigenetic Regulation for Heat Stress Adaptation in Plants: New Horizons for Crop Improvement under Climate Change: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/9/2105>

WGI. (2021). *ipcc*. Hentet fra IPCC Working Group I (WGI): Sixth Assessment Report: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

WGII. (2022). *ipcc*. Hentet fra Chapter 13: Europe: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter13.pdf

Bilag 1 - $\Delta\Delta C_t$ -metoden

$\Delta\Delta C_t$ -metoden (Comparative Ct) bruges i RT-qPCR til at beregne relativ genekspression, dvs. hvor meget et gen udtrykkes i en behandlet prøve i forhold til en kontrol.

C_t (cycle threshold) er det antal PCR-cykler, hvor fluorescensen fra PCR-produktet overstiger baggrundssignalet. Jo lavere C_t , desto mere af det pågældende mRNA var til stede i starten.

For hver enkelt prøve udregnes forskellen mellem ens målegen og et stabilt referencegen.

$$\Delta C_t = C_{t.\text{målegen}} - C_{t.\text{referencegen}}$$

Dette normaliserer for variation i RNA-mængde og kvalitet.

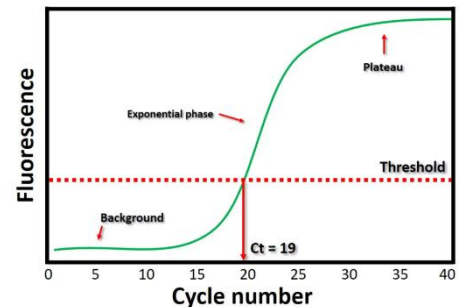
Dernæst sammenlignes den behandlede prøve med en kontrol:

$$\Delta\Delta C_t = \Delta C_{t.\text{behandlet}} - \Delta C_{t.\text{kontrol}}$$

Til sidst omdannes $\Delta\Delta C_t$ til et fold ændrings-udtryk, der viser, hvor mange gange et gen er op- eller nedreguleret:

$$\text{Fold ændring} = 2^{-\Delta\Delta C_t}$$

- Hvis resultatet er $>1 \rightarrow$ genet er opreguleret
- Hvis resultatet er $<1 \rightarrow$ genet er nedreguleret



Figur 1: RT-qPCR amplifikationskurve, C_t -værdien (19) angiver, hvornår fluorescensen overstiger threshold og adskilles fra baggrundsstøj