

8202-2026

Dynamikk i sommervanntemperaturer i norske elver

Med fokus på hetebølger, effekter av bresmelting og elver i Mjøsas nedbørfelt



Rapport

Norsk institutt for vannforskning STI

Løpenummer: 8202-2026

ISBN 978-82-577-7940-5
NIVA-rapport
ISSN 1894-7948

Denne rapporten er kvalitetssikret iht. NIVAs kvalitetssystem og godkjent av:

Jan-Erik Thrane
Prosjektleder

Rolf David Vogt
Kvalitetssikrer

Laurence Carvalho
Forskningsleder

© Norsk institutt for vannforskning STI.
Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse.

Forsidebilde:
Jan-Erik Thrane

www.niva.no

Tittel	Sider	Dato
Dynamikk i sommervanntemperaturer i 33 + vedlegg norske elver – med fokus på hetebølger, effekter av bresmelting og elver i Mjøsas nedbørfelt		26.05.2026

Forfatter(e)	Fagområde	Distribusjon
Jan-Erik Thrane, James Edward Sample, Leah Jackson-Blake	Ferskvannsbiologi	Åpen

Oppdragsgiver(e)	Kontaktperson hos oppdragsgiver
Vassdragsforbundet for Mjøsa med tilløpselver	Heidi Eriksen

Utgitt av NIVA
Prosjektnummer 250205

Sammendrag

Denne rapporten presenterer resultater fra analyser av sommervanntemperaturer i 240 norske elver, med fokus på variasjon mellom vassdrag, sammenheng mellom vann- og lufttemperatur gjennom sommeren, og temperaturresponser under hetebølger. Resultatene viser at vanntemperaturen i stor grad styres av lufttemperaturen, med dempende effekter av snøsmelting, vannføring og innsjøer oppstrøms. Det var minimal effekt av andelen isbre (bredekning) i nedbørfeltet på oppvarming under varmeperioder. Vanntemperaturene under hetebølgene i 2018 og 2025 viste ekstreme avvik fra normalen i elver over hele landet, med temperaturer som statistisk sett forventes sjeldnere enn én gang hvert 30. år. Elver med stor bredekning hadde lavere absolutte temperaturer under hetebølger, men ble varmet opp like mye i forhold til årstidsnormalen. Temperaturdata fra Otta, Sjøa og Gudbrandsdalslågen viste liten effekt av bredekning på oppvarming – den nedkjølede effekten av smeltevann fra breer var ikke synlig når elvene nådde lavlandet. Våre resultater antyder at snø og snøsmelting er viktigere for nedkjøling enn bresmelting, med unntak av vassdrag med svært høy bredekning (> 20 %) og sent på sommeren. Resultatene har implikasjoner for framtidige klimaendringer, der økende lufttemperatur og hyppigere hetebølger sannsynligvis vil føre til høyere vanntemperaturer og hyppigere ekstreme temperaturhendelser i elver og innsjøer.

Emneord: Vanntemperatur, hetebølger, elver, Mjøsa

Keywords: Water temperature, heat waves, rivers, Mjøsa

Siteres som: Thrane, J.-E., Sample, J. E., & Jackson-Blake, L. (2026). Dynamikk i sommervanntemperaturer i norske elver – med fokus på hetebølger, effekter av bresmelting og elver i Mjøsas nedbørfelt (NIVA-rapport 8202-2026). Norsk institutt for vannforskning STI.

Innholdsfortegnelse

Forord	3
Sammendrag	4
Summary	6
1 Innledning	8
2 Materialer og metode	10
2.1 Datakilder og seleksjon av data	10
3 Resultater og diskusjon	14
3.1 Oversikt over datasettet på vanntemperatur i elver	14
3.2 Hvordan er sommervanntemperatur i elver relatert til ulike elve- og nedbørfeltkarakteristikker?	16
3.3 Hvordan responderer vanntemperatur på lufttemperatur, og hvordan påvirkes denne sammenhengen av elve- og nedbørfeltkarakteristikker?	18
3.4 Vanntemperatur i elver under hetebølger	20
3.5 Effekter av framtidige klimaendringer	28
3.6 Tiltak for å styrke vassdragsøkosystemers resiliens i møte med oppvarming	28
4 Sammendrag og konklusjon	29
5 Referanser	32
6 Vedlegg	34

Forord

Denne rapporten er finansiert av Vassdragsforbundet for Mjøsa med tilløpselver, med bidrag fra Miljødirektoratet. Jan-Erik Thrane har ledet arbeidet, skrevet mesteparten av teksten, analysert dataene og laget figurene. James Sample har stått for nedlasting av alle data fra elver og kommet med innspill til analysene. Leah Jackson-Blake har vært en viktig bidragsyter til analyser, tolkning av resultater og vurdering av hydrologiske effekter. Hun har kommet med innspill til teksten og bidratt til skrivingen av sammendrag og konklusjon. Rolf David Vogt har kvalitetssikret rapporten.

I arbeidet med denne rapporten er det benyttet kunstig intelligens (KI) i forbindelse med statistiske analyser, primært som hjelp til å foreslå deler av analysekoden i statistikkprogrammet R. KI er også brukt til å generere forslag til oppsummerende tekst, blant annet om statistiske resultater og statistisk metodikk. Alt innhold er gjennomgått, redigert og faglig vurdert av forfatterne. Det er ikke lastet opp personopplysninger eller sensitiv informasjon i KI-verktøyet. Forfatterne er ansvarlige for det faglige innholdet i rapporten.

Jan-Erik Thrane, Oslo, 22 mai 2026

Sammendrag

I denne rapporten presenteres analyser av sommervanntemperaturer i norske elver, med fokus på variasjon mellom vassdrag, sammenhengen mellom vann- og lufttemperatur gjennom sommeren, og temperaturresponser under hetebølger. Vi undersøker også hvordan snøsmelting, vannføring og andelen av nedbørfeltet dekket av isbreer (bredekning) og innsjøer påvirker oppvarmingen, med særlig søkelys på bredpåvirkede vassdrag og vassdrag i Gudbrandsdalslågen/Mjøsas nedbørfelt. Et datasett med 70 elver med minimal effekt av regulering på vanntemperatur ble analysert for å avdekke eventuelle forskjeller mellom uregulerte og andre vassdrag.

Sommervanntemperaturen i norske vassdrag var sterkt og lineært relatert til gjennomsnittlig lufttemperatur i nedbørfeltet. Store elver var varmere enn små, noe som trolig gjenspeiler høydegradienter, siden elver med høy vannføring typisk ligger i lavlandet. Nedbørfelt med stor snøsmelting hadde vesentlig lavere sommertemperaturer. Gitt at snøsmelting var med som forklaringsvariabel, var det ingen signifikant forskjell i temperatur mellom elver med ulik bredekning. Elver i Nord-Norge var kaldere enn i Sør-Norge under ellers like forhold. Resultatene fra uregulerte elver var sammenliknbare med resultatene fra det fulle datasettet.

Relative avvik (z-scores) fra årstidsnormalen for vann- og lufttemperatur var tett korrelert: Uker med over normalt høy lufttemperatur hadde over snittet høy vanntemperatur, mens høy snøsmelting og vannføring ga kaldere vann enn normalt. Snøsmelting dempet lufttemperatureffekten, men fjernet den ikke. Effekten av lufttemperatur var uavhengig av bredekning, med ett unntak: i vassdrag med mer enn 20 % bre var oppvarmingen noe svakere på sensommeren, i tråd med at bresmelting blir relativt viktigere når snøsmelting avtar utover sommeren. Andelen innsjøer (% av areal) i nedbørfeltet var relatert til økt oppvarming mai, men hadde en dempende effekt på oppvarming om sommeren. Denne effekten økte fra juni til august. Resultatene fra uregulerte elver viste de samme trendene, med unntak av at den dempende effekten av andelen innsjøer ikke var statistisk signifikant.

Vanntemperaturene under hetebølgene i 2018 og 2025 viste ekstreme avvik fra normalen i elver over hele landet, med temperaturer som statistisk sett forventes sjeldnere enn én gang hvert 30. år. Vann- og lufttemperaturen fulgte hverandre tett, men med et etterslep som gjorde at vannet holdt seg unormalt varmt også uken(e) etter at lufttemperaturen normaliserte seg. Bredpåvirkede vassdrag var absolutt sett kaldere under hetebølgene, men i forhold til normalen for årstiden var de like varme som ikke-bredpåvirkede vassdrag. Dette viser at hetebølger gir både sterke og vedvarende effekter i elvene.

Analyser av vanntemperatur i Otta (bredpåvirket), Sjøa (bredpåvirket) og Gudbrandsdalslågen oppstrøms Otta (ikke bredpåvirket) viste at temperaturen konvergente mot sammenliknbare verdier i lavlandet, uavhengig av bredekningen oppstrøms. Dette indikerer at den gjenværende nedkjølede effekten av bresmeltevann er minimal når elvene når lavlandet, trolig fordi oppholdstiden er tilstrekkelig for varmeopptak. Snøsmelting ser dermed ut til å være viktigere for nedkjøling enn bresmelting, særlig tidlig på sommeren.

Vanntemperaturen i Mjøsa (0–10 m) sommerstid var godt korrelert med temperaturen i Lågen og Otta, og hadde omtrent samme temperatur som nedre deler av Lågen. Stor andel høyfjell og mye snøsmelting i nedbørfeltet bidrar til at Mjøsa tilføres relativt kaldt vann gjennom sommeren. Mjøsa er en dyp innsjø med et stort volum av 4-graders vann under termoklinen, noe som gjør at vanntemperaturen i stor grad også styres av vind- og sirkulasjonsforhold.

Resultatene har implikasjoner for framtidige klimaendringer, der økende lufttemperatur og hyppigere hetebølger sannsynligvis vil føre til høyere vanntemperaturer og hyppigere ekstreme

temperaturhendelser i elver og innsjøer. Selv om snøsmelting, bresmelting og innsjøer oppstrøms kan dempe oppvarmingen noe, viser analysene at disse effektene i begrenset grad forhindrer ekstreme temperaturavvik, særlig under hetebølger.

I Innlandet ventes det at sommertemperaturen vil øke med rundt 3 grader fram mot år 2100, samtidig som at vannføringen vil avta om sommeren fordi snøsmeltingen blir ferdig tidligere og fordampingen øker. Breene vil minke og bidraget til vannføring fra bresmelting vil etter hvert avta. Samlet sett vil dette kunne gi betydelig høyere sommervanntemperaturer i Gudbrandsdalslågen/Mjøsas nedbørfelt.

Generelt innebærer klimaendringene økt risiko for termisk stress hos vannlevende organismer, redusert habitatkvalitet for kaldevannarter og økt behov for tiltak som sikrer at elveøkosystemer er best mulig rustet mot framtidig oppvarming. Slike tiltak inkluderer kantsoner som skaper skygge, tilgang til kaldevannsrefugier som grunnvannspåvirkede områder og dype kulper, tilstrekkelig (minste)vannføring og restaurering for å sikre lateral og longitudinal konnektivitet.

Summary

This report presents analyses of summer water temperatures in Norwegian rivers, with a focus on variation among catchments, the relationship between water and air temperature throughout the summer, and temperature responses during heatwaves. We also examine how snowmelt, discharge, and the proportion of the catchment covered by glaciers (glacier cover) and lakes influence warming, with particular emphasis on glacier-fed catchments and catchments within the Gudbrandsdalslågen/Lake Mjøsa drainage basin. A dataset of 70 rivers with minimal regulation effects on water temperature was analysed to identify potential differences between unregulated and other catchments.

Summer water temperatures in Norwegian rivers were strongly and linearly related to mean catchment air temperature. Large rivers were warmer than small rivers, likely reflecting altitudinal gradients, as high-discharge rivers typically drain lowland areas. Catchments with high snowmelt had substantially lower summer water temperatures. When snowmelt was included as an explanatory variable, there was no significant difference in temperature between rivers with different glacier cover. Under otherwise comparable conditions, rivers in northern Norway were colder than those in southern Norway. The results from unregulated rivers were comparable to the results from the full dataset.

Relative anomalies (z-scores) from the seasonal norm in water and air temperature were closely correlated: weeks with above-normal air temperatures also had above-normal water temperatures, while high snowmelt and discharge were associated with below-normal water temperatures. Snowmelt attenuated the air temperature effect but did not eliminate it. The effect of air temperature was generally independent of glacier cover, with one exception: in catchments with more than 20% glacier cover, warming was somewhat weaker in late summer, consistent with glacier melt becoming relatively more important as snowmelt declines later in the season. The proportion of lakes (% of catchment area) was associated with increased warming in May, but had a dampening effect on warming during summer, an effect that increased from June to August. The results from unregulated rivers showed the same trends, with the exception that the dampening effect of upstream lakes was not statistically significant.

Water temperatures during the heatwaves of 2018 and 2025 showed extreme anomalies from the seasonal norm in rivers across the country, with temperatures that statistically are expected less than once every 30 years. Water and air temperatures tracked each other closely, but with a lag that caused water temperatures to remain anomalously high for one or more weeks after air temperatures had returned to normal. Glacier-fed rivers were cooler in absolute terms during the heatwaves, but warmed as much relative to their seasonal norms as non-glaciated rivers. This demonstrates that heatwaves produce both strong and persistent effects in rivers.

Analyses of water temperatures in the Otta (glacier-fed), Sjøa (glacier-fed), and Gudbrandsdalslågen upstream of Otta (non-glaciated) showed that temperatures converged toward comparable values in the lowlands, regardless of upstream glacier cover. This suggests that any remaining cooling effect of glacier meltwater is minimal by the time rivers reach the lowlands, likely because transit time is sufficient for thermal equilibration. Snowmelt thus appears to be more important for river cooling than glacier melt, particularly early in the summer.

Summer water temperatures in Lake Mjøsa (0–10 m depth) were well correlated with temperatures in the Lågen and Otta, and were broadly similar to those in the lower reaches of Lågen. The large proportion of high mountain terrain and substantial snowmelt in the catchment means that Mjøsa receives relatively cold water throughout the summer. Mjøsa is a deep lake with a large volume of 4°C water below the

thermocline, which means that surface water temperatures are also strongly governed by wind and circulation dynamics.

The results have implications for future climate change, as rising air temperatures and more frequent heatwaves will likely lead to higher water temperatures and more frequent extreme temperature events in rivers and lakes. Although snowmelt, glacier melt, and upstream lakes can dampen warming to some extent, the analyses show that these effects provide limited protection against extreme temperature anomalies, particularly during heatwaves.

In the Innlandet region, summer air temperatures are projected to increase by around 3°C by 2100, while summer discharge is expected to decline as snowmelt concludes earlier in the season and evaporation increases. Glaciers will retreat and their contribution to summer discharge will diminish. Taken together, these changes could lead to substantially higher summer water temperatures in the Gudbrandsdalslågen/Lake Mjøsa catchment.

In general, climate change entails increased risks of thermal stress for aquatic organisms, reduced habitat quality for cold-water species, and a growing need for measures that ensure river ecosystems are as well prepared as possible for future warming. Such measures include riparian buffer zones that provide shading, access to cold-water refugia such as groundwater-fed areas and deep pools, adequate minimum flows, and restoration to ensure lateral and longitudinal connectivity.

1 Innledning

Klimaendringene gir økt lufttemperatur og økt frekvens og intensitet av hetebølger både globalt og i Nord-Europa (Dyrddal mfl. 2025; IPCC, 2021). Dette påvirker også vanntemperaturer og det er allerede vist at både elver og innsjøer har blitt signifikant varmere gjennom siste halvdel av forrige århundre og fram mot i dag (Johnson mfl. 2024). For innsjøer verden over er det f.eks. dokumentert en økning i middeltemperatur på ca. 0,3 grader per tiår i perioden 1985-2009 (O'Reilly mfl. 2015; Dokulil mfl. 2021) – en økning som er sammenliknbar med det som er observert i Mjøsa (Thrane mfl. 2026). Trender i samme størrelsesorden er dokumentert for elver i England og Wales (Orr mfl. 2014) og Skottland (Loerke mfl. 2023). Globalt indikerer modeller at det har vært en midlere økning i vanntemperatur på 0,16 grader per tiår fra 1960–2014, men med raskere økning (opp mot 0,6 grader per tiår) for maksstemperatur i elver på den nordlige halvkule (Wanders mfl. 2019). Det er også indikasjoner på økende frekvenser hetebølger i elver (Sadayappan & Li, 2025) og marint (Oliver mfl. 2018). Vanntemperaturer forventes å øke som følge av klimaendringene (van Vliet mfl. 2011, Johnson mfl. 2025).

Varmere vann gir redusert oksygenløselighet, sterkere temperatursjiktning i innsjøer og økt metabolisme hos vekselvarme vannlevende organismer som fisk, krepsdyr og insekter. Under varmeperioder kan økt respirasjon gi slike organismer et større behov for oksygen, samtidig som tilgangen på oksygen blir dårligere på grunn av lavere løselighet. For organismer som kan bevege seg aktivt, som fisk, vil dette kunne føre til endringer i adferd og habitatbruk – f.eks. forflytning til kaldere og mer oksygenrikt vann, som er en vanlig strategi hos oksygenkrevende arter som ørret og røye. Mindre mobile organismer som plankton og bunndyr må håndtere de til enhver tid gjeldende temperatur- og oksygenforholdene. Selv om slike organismer er tilpasset betydelige variasjoner i abiotiske forhold, vil ekstreme temperaturer – og kanskje spesielt hetebølger – påvirke organismenes overlevelse og over tid kunne favorisere varmtvannstilpassede arter framfor kaldtvanns- og oksygenkrevende arter. Hetebølger og klimarelatert oppvarming påvirker dermed økosystemene i ellers lite påvirkede vassdrag. Mer eutrofe systemer er imidlertid mer utsatt for oksygenvinn og episoder med f.eks. fiskedød, som følge av økt nedbrytning av organisk materiale, særlig under langvarige perioder med stabil temperatursjiktning som forhindrer reoksygenering av oksygenfattig bunnvann.

Langvarige akvatiske hetebølger påvirker ikke bare individer, arter og økosystemer, men også økosystemtjenestene vassdragene gir. Hetebølger øker antakelig risikoen for oppblomstring av cyanobakterier i innsjøer (Jöhnk mfl. 2008), med konsekvenser for bading og rekreasjon. I tillegg begrenses muligheten for sportsfiske, da laksefisk kan oppleve økt dødelighet ved «fang og slipp»-fiske når temperaturene overstiger omkring 20 °C (Gale mfl. 2011). Flere lakseelver i Norge har f.eks. vært stengt under hetebølger de senere årene. Også i Renaelva, som normalt er relativt kjølig om sommeren, var fisket stengt under hetebølgene somrene 2018 og 2025, som følge av elvetemperaturer over 20 grader. Hetebølger sammenfaller også ofte med tørke og lav vannføring, med synergistiske negative effekter på økosystemer.

Til tross for at vanntemperatur primært styres av solinnstråling og lufttemperatur (Caissie 2006) er det ikke nødvendigvis slik at hetebølger på land gir tilsvarende temperaturekstremer i vann. En analyse av 275 nedbørfelt i Alpene (Van Hamel mfl. 2026) viste for eksempel at kun halvparten (47 %) av atmosfæriske hetebølger førte til hetebølger i elvene, der en hetebølge ble definert som at temperaturen lå over den historiske 90-persentilen for det aktuelle tidsrommet i fem dager eller mer. Årsaken til dette var primært at snø- og bresmelting fungerte som en buffer mot oppvarmingen, slik at sammenhengen mellom luft- og vanntemperatur i en del nedbørfelt ikke var 1:1 (van Hamel mfl. 2026). Svak korrelasjon mellom luft- og vanntemperatur forventes i deler av året, for eksempel under snøsmeltingen om våren. Det forventes også en svakere sammenheng i vassdrag dominert av grunnvann, hvor

sommervanntemperaturen typisk er mer stabil (Johnson mfl. 2020). Slike vassdrag er imidlertid mindre vanlige i Norge. Også temperaturen i elver som kommer fra store og dype innsjøer og regulerte vassdrag med vannmagasiner kan ha dårligere korrelasjon med lufttemperatur. Her påvirkes elvetemperaturen i stor grad av fysiske prosesser i innsjøene eller magasinene, som sirkulasjon, vindretning og vindstyrke, samt reguleringsregime.

Vassdrag i nedbørfelt med stort innslag av isbreer, og hvor en vesentlig del av vannføringen sommerstid kommer fra bresmelting, har ofte en vannføring som er mer stabil under varme- og tørkeperioder (se f.eks. Bakke mfl. 2020). Smeltevannet holder i utgangspunktet lav temperatur, og en hypotese er at vanntemperaturen i slike elver er svakere korrelert med lufttemperaturen fordi bresmelting demper oppvarmingen. Dermed kan bresmelting fungere som en buffer mot klimarelatert oppvarming i vassdrag nedstrøms. I Mjøsa har middeltemperaturen i overflata økt jevnt gjennom de siste 40 årene, men økningen i maksimumstemperaturen har flatet ut (Thrane mfl. 2026). En mulig forklaring på dette er at oppvarmingen dempes av økt bresmelting og tilførsel av kaldt smeltevann gjennom sommeren fra nedbørfeltene til brepåvirkede elver som Otta og Sjøa. Det mangler imidlertid en grundig analyse av slike effekter av bresmelting på vanntemperatur i norske vassdrag.

I denne rapporten benytter vi vanntemperaturdata fra et stort antall norske elver for å undersøke romlig og tidsmessig dynamikk i vanntemperaturer om sommeren. Vi analyserer hva som karakteriserer elver og nedbørfelt med høye sommervanntemperaturen; hvordan vanntemperatur henger sammen med lufttemperatur; og hvordan lufttemperatureffekten modereres av variabler som bredekning, snøsmelting og vannføring. Vi undersøker også om det er forskjeller mellom uregulerte og andre vassdrag. I tillegg analyserer vi dynamikken i vanntemperatur under de langvarige varmeperiodene/hetebølgene sommeren 2018 og i juli 2025. I den forbindelse ser vi spesifikt på responser i brepåvirkede og ikke-brepåvirkede vassdrag i nedbørfeltet til Gudbrandsdalslågen/Mjøsa og hvordan vanntemperaturen i Mjøsa er relatert til dette.

Hovedspørsmålene vi undersøker er:

- Hvordan er sommervanntemperaturen i elver relatert til ulike elve- og nedbørfeltkarakteristikker?
- Hvordan responderer vanntemperatur på endringer i lufttemperatur gjennom sommeren, og hvordan påvirkes denne sammenhengen av faktorer som bre- og snøsmelting og vannføring?
- Hvor høye var vanntemperaturene i elver under hetebølgene sommeren 2018 og i juli 2025?
- Hvordan endret vanntemperaturen seg gjennom hetebølgene?
- Ble brepåvirkede elver varmet opp i mindre grad enn andre elver under hetebølgene?
- Var det forskjell i oppvarming mellom nedbørfelt med ulik bredekning i Gudbrandsdalslågen/Mjøsas nedbørfelt? Og hvordan forventes vanntemperaturen i dette området å utvikle seg som følge av klimaendringene?

Resultatene vil styrke kunnskapen om mulige framtidige konsekvenser av klimaendringer på vanntemperatur og akvatiske økosystemer og gi grunnlag for å vurdere aktuelle tiltak, som å sikre tilgang til kaldtvannsrefugier (f.eks. dype kulper og områder med grunnvannstilførsel), kantsoner som gir skygge og tilstrekkelig minstevannføring under varmeperioder.

2 Materialer og metode

2.1 Datakilder og seleksjon av data

2.1.1. Datakilder og variabler

Data på daglig målt middelvanntemperatur og andre modellerte hydrologiske og klimatiske parametere ble lastet ned fra NVE. Vi lastet ned alle målte vanntemperaturdata fra målestasjoner i norske elver i perioden 1990–2025, totalt 527 stasjoner. For alle stasjoner beregnet vi nedbørfeltet oppstrøms ved hjelp av [nivapy](#)¹, en Python-pakke utviklet av NIVA for å støtte datavitenskapelige arbeidsflyter, inkludert hydrologisk prosessering.

For dagene der det forelå målte verdier for vanntemperatur, lastet vi ned følgende gjennomsnittlige modellerte data (enhet og parameternavn i parentes) fra nedbørfeltet oppstrøms målestasjonen, igjen fra NVE via GTS API²: lufttemperatur (°C, `gts_avg_tm_c`), avrenning (mm, `gts_avg_gwb_mm`); regn + snøsmelting (mm, `gts_avg_qtt_mm`); nedbør (snø om vinteren, regn ellers) (mm, `gts_av_rr_mm`), og vannføring ved nedbørfeltets utløp, beregnet fra modellert avrenning og nedbørfeltareal. Vi lastet også ned tilgjengelige målinger av vannføring (middelvannføring per døgn, m³/s). Det forelå kun målte vannføringsdata for 44 % av stasjonene, så vi benyttet modellert vannføring i de videre analysene. Modellert vannføring fanger ikke opp effekter av regulering.

For å få et estimat på ren snøsmelting beregnet vi differansen mellom regn + snøsmelting (`gts_avg_qtt_mm`) og nedbør (`gts_avg_rr_mm`). Sommerstid vil denne variabelen ha positive verdier og representere snøsmelting.

Prosentvis dekning av ulike arealtyper i nedbørfeltene ble beregnet fra det nasjonale datasettet for landdekning AR50 fra NIBIO ved bruk av de øverste kategoriene «Arealtyper»³.

Data på vanntemperatur fra Mjøsa er samlet inn gjennom det tiltaksorienterte overvåkingsprogrammet for Mjøsa med tilløpselver, og ble hentet fra NIVAs interne databaser.

2.1.2. Filtrering og seleksjon av data fra elver

Rådatasettet for vanntemperatur inneholdt målte data fra 527 stasjoner, men antall år med data per stasjon varierte. Det var også varierende datakvalitet, blant annet i form av hull i tidsseriene og perioder med feilmålinger. Før dataene kunne benyttes i analysene, måtte datasettet kvalitetssikres og klargjøres gjennom relevant filtrering og seleksjon av data. Denne prosessen innebar følgende steg:

Først gjorde vi en grov filtrering basert på ekstremverdier, der alle dager med vanntemperatur < -1 grad eller > 30 grader ble fjernet. Deretter fjernet vi alle stasjoner som hadde vanntemperaturdata fra færre enn 10 ulike år i perioden 1990–2025. Vi satt da igjen med 347 stasjoner og 6 900 stasjonsår (= stasjon x antall år). Deretter satte vi kriterier for minimumsfrekvens på målinger per stasjon. Først markerte vi en måned som «komplett» dersom det forelå data fra minst 80 % av dagene i måneden. Deretter markerte vi et år som «komplett» dersom det forelå data fra minst 11 «komplette» måneder. Ettersom de fleste analysene i denne rapporten fokuserer på sommertemperaturer, definerte vi også et år som «komplett» med hensyn til sommertemperatur dersom det forelå komplette data fra alle månedene mai til september.

¹ <https://github.com/NIVANorge/nivapy3>

² <https://gts.nve.no/api>

³ <https://www.nibio.no/tema/jord/arealressurser/ar50/arealtype>

Vi gjorde deretter en visuell sjekk av data fra alle stasjoner og år som hadde «komplette» sommerdata. Dette ble gjort ved å plote tidsserier for vanntemperatur per stasjon og gjennomgå plottene visuelt for å identifisere perioder med åpenbare feilmålinger (f.eks. konstant temperatur over tid eller spesielt avvikende temperaturer for årstiden, som begge kan tyde på instrumentsvikt eller målinger i luft). Etter visuell kvalitetssikring fjernet vi alle eller enkelte år med data fra 27 stasjoner.

Deretter gjorde vi en ny seleksjon av dataene, der vi kun inkluderte stasjoner som hadde komplette data fra sommerperioden for minst 10 år i tidsrommet 1995-2025 (de siste 30 årene). Vi ønsket å ha minst 10 år med data, ettersom vi senere beregnet avvik fra normalen (z-scores) for vanntemperatur og aktuelle forklaringsvariabler. Dette krever flere år med data for å gi meningsfulle og robuste estimater. Vi satt da igjen med data fra 277 stasjoner og 5 238 stasjonsår.

Som en siste visuell sjekk plottet vi vanntemperatur for perioden mai–september (ettersom vi fokuserer på sommertemperaturer i den videre analysen) mot dagnummer for hver stasjon og hvert år som oppfylte kravene over. Disse figurene viste at det fortsatt var en del avvikende data for mange stasjoner, f.eks. dager med ekstremt høye temperaturer (> 20 grader) i starten av mai eller plutselige og ekstreme fall i temperaturen midtsommers. Vi tolket dette som feilmålinger som burde fjernes før videre analyse.

På grunn av store datamengder måtte vi utvikle en form for automatisk deteksjon av slike feilmålinger. Vi endte med å beregne avvik fra median vanntemperatur for hvert dagnummer per elv, og satte et kriterium for maksimalt tillatt avvik fra mediantemperatur. Basert på månedsvise fordelinger av avvikene valgte vi å markere målinger som var høyere enn 99,75-persentilen eller lavere enn 0,25-persentilen. Basert på visuell sjekk av dataene fanget dette opp de fleste åpenbare feilmålingene, men muligens også enkelte reelle høye verdier. Der det var tvil om avviket skyldtes feil eller reelle ekstreme verdier, ble dataene beholdt. Ellers fjernet vi disse dataene fra datasettet. Vi fjernet også manuelt 37 stasjoner som hadde tvilsomme data basert på plottene av vanntemperatur mot dagnummer. Til slutt satt vi igjen med 240 stasjoner og 4 565 stasjonsår.

2.1.3. Effekter av regulering

Datasettet over inkluderer både regulerte og uregulerte vassdrag. Det var et pragmatisk valg å inkludere begge typer, siden detaljert informasjon om reguleringsgrad og reguleringsregime ikke var lett tilgjengelig for alle stasjoner. Hovedresultatene er dermed representative for norske vassdrag slik de faktisk fremstår, men gjenspeiler ikke nødvendigvis uregulerte, naturlige forhold.

Regulering kan imidlertid påvirke temperaturdynamikken bl.a. gjennom endret vannføring, magasin effekter og overføringer mellom nedbørfelt. For å teste om sammenhengene var annerledes i uregulerte elver, repeterte vi regresjonsanalysene beskrevet i kap. 2.1.4 **Error! Reference source not found.** kun med data fra 70 elver som i henhold til en rapport fra NVE⁴ har ingen eller minimale effekter av regulering på temperatur.

2.1.4. Statistiske analyser

Del 1: Analyser av variasjon i sommervanntemperatur mellom elver

Her benyttet vi gjennomsnittsverdier per stasjon ($n = 240$; se **Figur 1**) for perioden juni–august (basert på data fra alle år) for å undersøke hvordan sommertemperaturen i elvene var relatert til ulike elve- og nedbørfeltkarakteristikker. Først tilpasset vi en lineær regresjon med vanntemperatur som funksjon av lufttemperatur + snøsmelting + log(vannføring) + % bre + % innsjø + log(nedbørfeltareal) + stasjonshøyde (moh.) + breddegrad. Vannføring og areal ble log-transformert på grunn av høyreskjevne fordelinger. Deretter beregnet vi variansinflasjonsfaktorer (VIF-verdier) for forklaringsvariablene i

⁴NVE's river and lake water temperature reference datasets for climate change. Last updated in Desember 2020 by Kjetil Melvold and Ånund Kvambekk (HB/NVE). <https://www.nve.no/media/13184/refseriewatertemp2021.pdf>

modellen. En VIF > 5 (Sheather 2009) indikerer at en forklaringsvariabel i stor grad kan forklares av de andre forklaringsvariablene, noe som gjør at modellen ikke klarer å skille deres individuelle effekter fra hverandre. Koeffisientene kan bli ustabile med store standardfeil, og tolkningen av enkelteffekter blir upålitelig. Vi fjernet nedbørfeltareal (høy korrelasjon med vannføring) og stasjonshøyde (moh.) (høy korrelasjon med lufttemperatur) fra modellen da de hadde VIF > 5. Resterende variabler hadde VIF < 5. Resultatene fra den lineære regresjonen indikerte at log(vannføring) og % innsjø hadde en ikke-lineær sammenheng med vanntemperatur. I stedet for en multipl regressjon benyttet vi derfor en generalisert additiv modell (GAM), hvor effekten av log(vannføring) og % innsjø ble inkludert som glatte effekter, mens de øvrige variablene ble beholdt som lineære effekter.

Del 2: Analyser av vanntemperaturens respons på lufttemperatur, og hvordan lufttemperatureffekten modereres av elve- og nedbørfeltetegenskaper

Her ønsket vi å analysere hvordan vanntemperatur responderer på lufttemperatur om sommeren, og hvordan denne responsen modereres av andre forklaringsvariabler som bredekning, snøsmelting under sommeren og vannføring. Her benyttet vi daglige data fra mai til september (men snevret senere inn til juni–august; se nedenfor) fra de 240 elvene som hadde komplette sommerdata fra minst 10 år. I stedet for å analysere målte verdier (som i del 1), analyserte vi her *avvik fra den årstidsspesifikke normalen* for både vanntemperatur og mulige forklaringsvariabler som lufttemperatur, vannføring og snøsmelting. På denne måten fjernes både variasjonen i temperatur mellom elver (dvs. at noen elver er varme og andre kalde) og den sesongmessige variasjonen i temperatur innad i hver elv. Dette gjør at dataene blir sammenliknbare på tvers av elver og måneder og kan analyseres i samme modell. Analysen kan da besvare spørsmål som: Gir perioder med over snittet høy lufttemperatur over snittet høy vanntemperatur? Gir perioder med over snittet høy snøsmelting om sommeren kaldere vann enn normalt? Og ikke minst – påvirkes lufttemperatureffekten av andre variabler: dempes f.eks. oppvarmingen i elver med stor andel isbre i nedbørfeltet eller når snøsmelting eller vannføring er relativt stor?

For vanntemperatur, lufttemperatur og log(vannføring) beregnet vi relative avvik som z-scores, som angir hvor mange standardavvik unna gjennomsnittet en verdi ligger. For f.eks. vanntemperatur (T) beregnet vi z-score som:

$$Z_{i,d} = \frac{T_{i,d} - \hat{\mu}_d}{\hat{\sigma}_d}$$

hvor $Z_{i,d}$ er z-score for dag d år i ; $\hat{\mu}_d$ er den gjennomsnittlige vanntemperaturen for dag d ; og $\hat{\sigma}_d$ er standardavviket for dag d .

For å estimere $\hat{\mu}_d$ og $\hat{\sigma}_d$ benyttet vi GAM. Den sesongmessige gjennomsnittstemperaturen ble modellert med en kubisk regresjonsspline (GAM-gjennomsnitt; vist i **Figur 1** for hele året for alle elver). Standardavviket ble estimert i to trinn. Først beregnet vi standardavviket per dagnummer på tvers av alle år. Deretter ble en GAM tilpasset logaritmen av disse standardavvikene for å gi en glatt, positiv kurve gjennom året. Log-transformasjonen sikrer at de predikerte standardavvikene forblir positive. Begge GAM-ene benyttet kubiske regresjonsspliner med $k = 15$ knutepunkter og ble tilpasset per stasjon. Z-scoren per dagnummer ble deretter beregnet som avviket fra den glattede gjennomsnittskurven, delt på det glattede standardavviket for det aktuelle dagnummeret.

For snøsmelting (mm) og nedbør (mm) kunne ikke z-score beregnes på grunn av et stort antall nuller i datasettet (dvs. dager med uten nedbør eller snøsmelting). Dette ga utfordringer ved estimering av standardavvik for noen stasjoner og deler av året. For disse variablene beregnet vi kun avvik fra normalen (anomalien) ved å trekke gjennomsnittet for dagnummeret fra den målte verdien. Anomali for snøsmelting og nedbør har derfor enhet mm og ikke standardavvik.

Forklaringsvariabler som var konstante for hver elv, f.eks. nedbørfeltareal (km²) og andel innsjø i nedbørfeltet (%), ble også standardisert til z-score ved å trekke fra gjennomsnittet og dele på standardavviket for de 240 elvene i datasettet. Dette sikrer at alle variabler har samme skala og en gjennomsnittsverdi = 0, noe som forenkler tolkningen av regresjonskoeffisientene. Andel isbre i nedbørfeltet ble inkludert som en faktorvariabel med fem klasser: ingen bre (0 %, n=141); lav (>0–3 %, n=60); middels (3–10 %, n=22); høy (10–20 %, n=7) og svært høy andel bre (> 20 %, n= 10).

Analysen av z-scores for vanntemperatur ble gjort ved hjelp av en lineær mixed effects-modell der z-score for vanntemperatur ble modellert som en funksjon av z-score for lufttemperatur og z-score for log(vannføring), anomali for snøsmelting og nedbør, z-score for log(nedbørfeltareal), z-score for andel innsjø i nedbørfeltet (%) og andel bre i nedbørfeltet (faktorvariabel). Vi benyttet ukentlige gjennomsnitt per stasjon for perioden juni til og med august, det vil si inntil 12 observasjoner per stasjon per år over minimum 10 år (totalt 59 367 observasjoner fra 240 stasjoner).

Temporal autokorrelasjon ble håndtert ved å spesifisere en AR(1)-korrelasjonstruktur (*first-order autoregressive*) innen stasjon × år. AR(1) innebærer at korrelasjonen mellom to observasjoner avtar eksponentielt med avstanden i tid, slik at nabouker er sterkest korrelert og uker langt fra hverandre er tilnærmet ukorrelerte. Uten denne korreksjonen ville standardfeilene vært kunstig lave og hypotesetestene upålitelige. Det ble inkludert en tilfeldig helning (*random slope*) for lufttemperatur per stasjon, som lar effekten av lufttemperatur på vanntemperatur variere mellom stasjoner. Dette er hydrologisk motivert: elver med ulike nedbørfeltetegenskaper – som bredekning, innsjøandel og areal – forventes å ha ulik termisk sensitivitet overfor atmosfærisk oppvarming. En random slope fanger opp denne mellom-elv-variasjonen i temperaturrespons, og sikrer at standardfeilene for de faste effektene er korrekte selv om sensitiviteten varierer systematisk mellom stasjoner. Interaksjonstestene som beskrives under undersøker i hvilken grad denne variasjonen kan forklares av nedbørfeltetegenskaper.

Modellen ble estimert med maximum likelihood (ML) for å muliggjøre sammenligning av modeller med ulike faste effekter via likelihood ratio-tester. Vi testet interaksjoner mellom z-score for lufttemperatur og andre variabler, henholdsvis andel bre, snøsmelting, vannføring, andel innsjø og nedbørfeltareal, for å undersøke om noe av variasjonen i lufttemperatureffekten kunne forklares av slike egenskaper. Siden nedbørfeltareal og innsjøandel ble standardisert basert på stasjonsnivåverdier (n = 240), vil koeffisienten for lufttemperatur representere en elv med gjennomsnittlig areal (444 km²) og gjennomsnittlig innsjøandel (6 %). Modellen ble implementert i R med pakken *nlme*.

For å teste om responsen varierte gjennom sommeren, kjørte vi samme modell på data fra kun mai, kun juni, kun juli og kun august, og sammenliknet resultatene med modellen der data fra hele sommeren (juni–august) ble analysert samlet.

Del 3: Responser i vanntemperatur under hetebølger

Vi beregnet ikke hetebølger basert på værddata i denne rapporten, men tok utgangspunkt i tre perioder der det ble registrert langvarig ekstrem varme og hetebølger over store deler av landet, og hvor våre data også indikerte ekstremt høye lufttemperaturer i forhold til normalen for årstiden. Den ene perioden var juli 2025, da det var hetebølger (maksimumstemperatur på > 27 grader i minst fem dager) i alle fylker og opp til 15 dager med temperaturer over 27 grader på Østlandet⁵ (Gangstø mfl. 2025). De to andre periodene var under «tørkesommeren» 2018 (Skaland mfl. 2018), spesielt den ekstremt varme og tørre mai-måneden og varmeperioden i juli samme år.

Vi plottet vanntemperatur og z-score for vanntemperatur per uke gjennom de aktuelle varmeperiodene for å vise tidsutviklingen i luft- og vanntemperatur; hvor ekstreme vanntemperaturene var sammenliknet

⁵ <https://www.met.no/nyhetsarkiv/juli-enda-2-8-grader-over-normalen>

med lufttemperaturene; og hvordan vanntemperaturen utviklet seg etter at lufttemperaturen avtok igjen. For å undersøke om bresmelting påvirket oppvarmingen under hetebølgene, plottet vi vanntemperatur og z-score for ulike klasser av bredekning.

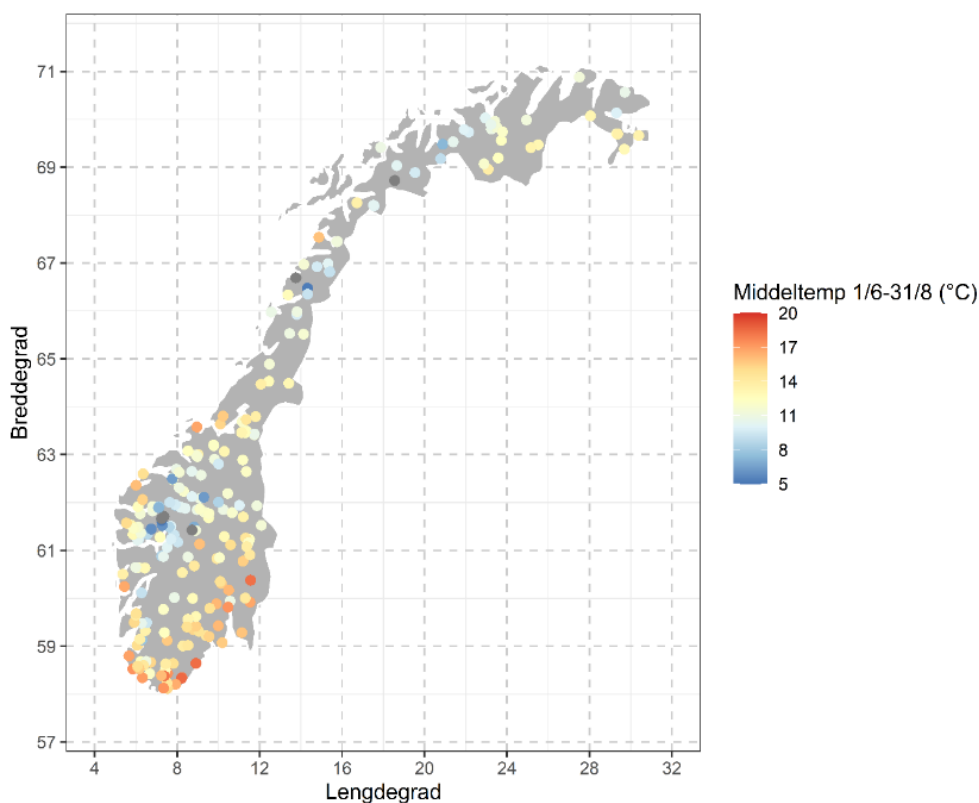
Case-studie i brepåvirkede og ikke-brepåvirkede vassdrag i Gudbrandsdalslågen/Mjøsas nedbørfelt

Vi hadde data fra stasjoner i Otta- og Sjoa-vassdragene, som begge er brepåvirkede; i Lågen oppstrøms Otta, som ikke er brepåvirket; og i nedre deler av Lågen, som har middels bredekning. Vi sammenliknet vanntemperatur og z-score for vanntemperatur under hetebølgene for å undersøke i hvilken grad bresmelting dempet oppvarmingen av elvevannet. Vi beregnet også middeltemperatur for sommeren (juni, juli og august) fra stasjonene i Otta, Sjoa og Lågen basert på data fra alle år, og korrelerte disse med hverandre for å avdekke hvorvidt de brepåvirkede stasjonene generelt har lavere sommertemperaturer. Vi korrelerte også temperaturen på disse lokalitetene med middeltemperaturen i Mjøsa (stasjon Brøttum nord i Mjøsa og stasjon Skreia sentralt i Mjøsa) fra 0-10 m i juni–august for å avdekke hvilken grad vanntemperaturen i Mjøsa styres av temperaturen i Lågen-vassdraget.

3 Resultater og diskusjon

3.1 Oversikt over datasettet på vanntemperatur i elver

Det filtrerte og kvalitetssikrede datasettet fra elver inneholdt komplette vanntemperaturdata fra 240 stasjoner fra > 10 år i perioden 1995–2025. Stasjonene var fordelt over hele landet (**Figur 1**) og representerte et bredt spenn i vanntemperatur og andre hydrologiske, geografiske og klimatiske variabler (oppsummert i **Tabell 1**).

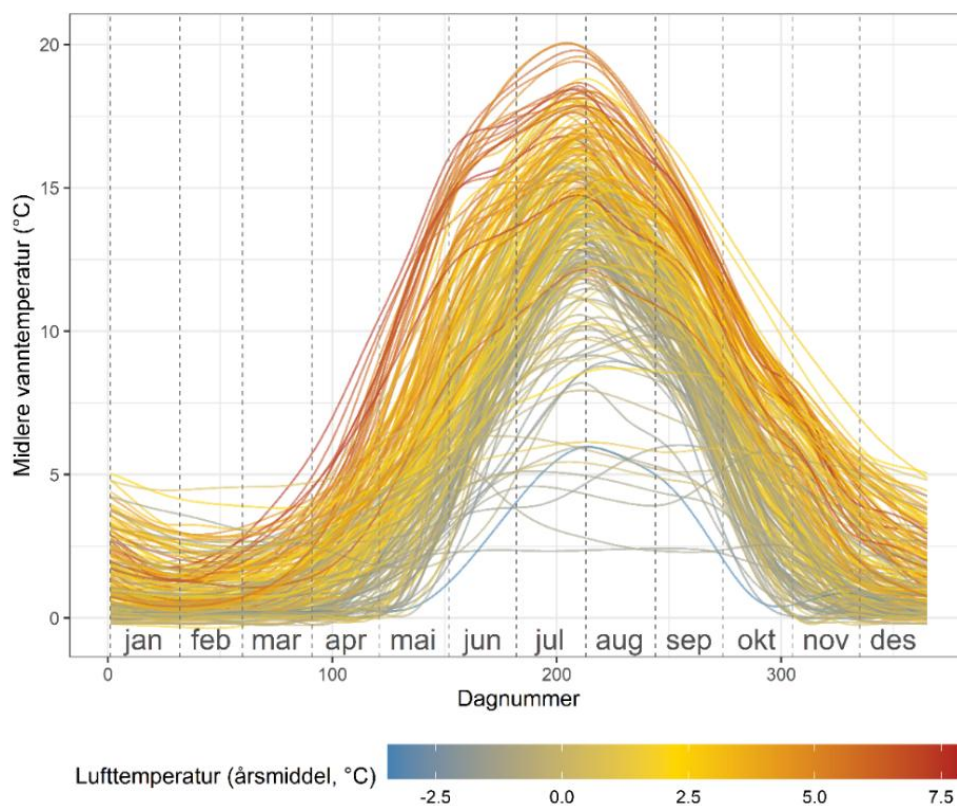


Figur 1. Oversikt over de 240 stasjonene som er inkludert i analysen. Fargeskalaen representerer gjennomsnittlig vanntemperatur for perioden juni til og med august.

Variasjonen i daglig gjennomsnittlig vanntemperatur gjennom året viste en spredning om sommeren fra opp mot 20 grader i de varmeste elvene til < 10 grader i de kaldeste (**Figur 2**). I halvparten av elvene kulminerte vanntemperaturen mellom 28. juli (første kvartil) og 4. august (tredje kvartil), og median dato for maksimum vanntemperatur var 31. juli.

Tabell 1. Fordeling (min, maks, median og første (Q1) og tredje (Q3) kvartil) av elve- og nedbørfeltvariabler for de 240 elvene i datasettet. 70 av elvene er vurdert å ha ingen eller minimal effekt av regulering på vanntemperatur. Verdiene er middelverdier for perioden juni til og med august for variablene som ikke er konstante (f.eks. høyde over havet og nedbørfeltareal). Høyde over havet representerer plasseringen til målestasjonen der vanntemperaturen er hentet fra. Vannføringen er beregnet fra modellert avrenning og nedbørfeltarealet oppstrøms stasjonen. Lufttemperatur, snøsmelting og nedbør er middelverdier for nedbørfeltet. Andelen isbre og innsjø i nedbørfeltet er oppgitt som prosent av arealet.

	Min	Q1	Median	Q3	Maks
Høyde over havet (m)	0	27	77	260	1 296
Nedbørfeltareal (km ²)	5	129	504	1 519	41 596
Isbreandel (%)	0,0	0,0	0,0	0,7	92,6
Innsjøandel (%)	0,0	3,1	4,9	8,4	16,4
Vanntemperatur, middel (°C)	2,4	10,4	12,1	14,3	18,6
Lufttemperatur, middel (°C)	4,8	8,4	10,4	11,5	16,3
Vannføring, middel (m ³ /s)	0,1	12,1	42,1	136,2	1 453,9
Snøsmelting, middel (mm/dag)	0,0	0,7	2,5	6,1	16,3
Nedbør, middel (mm/dag)	1,8	2,7	3,3	4,0	8,9



Figur 2. Midlere temperaturutvikling gjennom året for de 240 stasjonene som er inkludert i analysen. Y-aksen viser daglig gjennomsnittlig vanntemperatur, mens x-aksen er dagnummer. Fargeskalaen angir årsmiddelverdi for lufttemperatur i nedbørfeltet.

3.2 Hvordan er sommervanntemperatur i elver relatert til ulike elve- og nedbørfeltkarakteristikker?

Gjennomsnittlig lufttemperatur, snøsmelting og vannføring i nedbørfeltet om sommeren, innsjødekning i nedbørfeltet og breddegrad kunne sammen forklare omtrent 80 % av variasjonen i sommervanntemperatur mellom elver (justert $R^2 = 0,809$; forklart devians = 82 %; $n = 240$; **Tabell 2**). Andel isbre i nedbørfeltet var ikke signifikant ($p = 0,16$) så lenge snøsmelting var med i modellen. Gjennomsnittlig nedbør hadde heller ingen signifikant forklaringsverdi ($p = 0,3$).

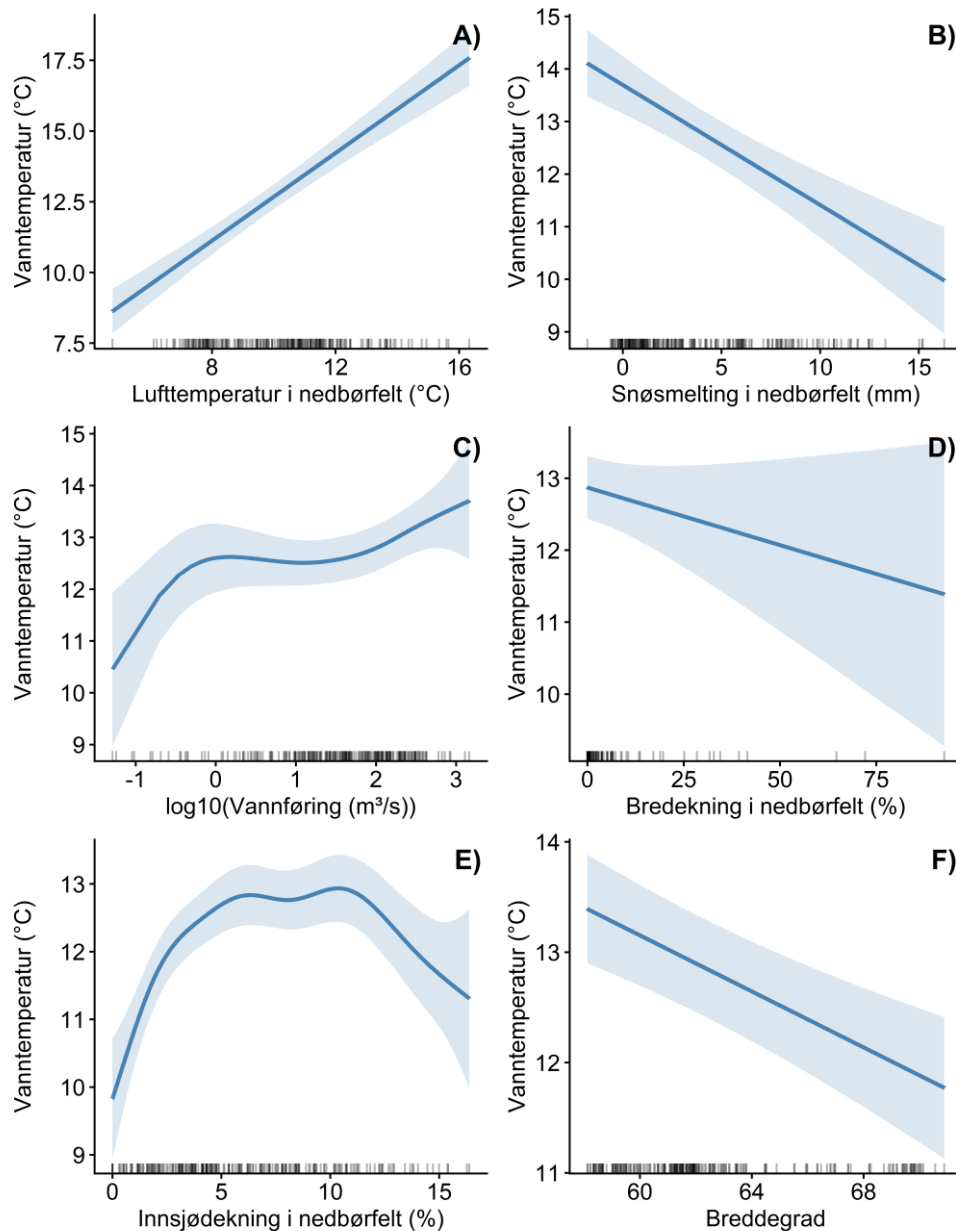
Effekten av lufttemperatur var sterkt signifikant ($p < 0,001$) og lineær (**Figur 1A**), med et stigningstall på 0,775 [95 % konfidensintervall: 0,64–0,91] (**Tabell 2**). Om man sammenlikner elver som ligger i nedbørfelt med ulik temperatur (f.eks. lavland vs. på fjellområder), vil en forskjell i lufttemperatur på én grad gi 0,64–0,91 graders forskjell i gjennomsnittlig vanntemperatur om sommeren. Dette er som forventet, ettersom vanntemperatur i elver typisk øker mindre enn lufttemperaturen, blant annet på grunn av termisk treghet og påvirkning fra prosesser som grunnvannstilførsel, vannføring og snøsmelting.

Det var en sterk signifikant ($p < 0,001$) negativ effekt av gjennomsnittlig snøsmelting (**Figur 1B**). Siden dette er gjennomsnittlig snøsmelting i perioden juni–august, representerer høye verdier elver som drenerer alpine nedbørfelt med relativt stor snøsmelting utover sommeren. Denne smeltingen bidrar til lavere sommervanntemperaturer, men den negative effekten kan delvis også skyldes at det er en negativ sammenheng mellom snøsmelting og nedbørfeltets midlere lufttemperatur (kalde nedbørfelt har mer snø; se **Vedleggsfigur 1**). Så lenge snøsmelting var inkludert i modellen, var ikke andelen bre signifikant ($p = 0,16$), noe som trolig reflekterer at nedbørfelt med høy breandel også ofte har stor snøakkumulering. Variablene overlapper derfor delvis i hva de beskriver, slik at andel bre gir begrenset tilleggsinformasjon når snøsmelting allerede er inkludert. I kap. 3.3. og 3.4 analyserer vi effekten av bre- og snøsmelting om sommeren nærmere for å teste om varmeperioder påvirker vanntemperaturen mindre i brepåvirkede vassdrag kontra ikke-brepåvirkede.

Gjennomsnittlig vannføring var signifikant positivt relatert til vanntemperatur ($p = 0,009$), men effekten var ikke lineær (**Figur 1C**). For små elver/bekker økte vanntemperaturen tydelig med vannføring opp til ca. 10 m³/s (0 på log₁₀-skala; se **Figur 1C**) før effekten flatet ut. For veldig store elver (med vannføring > 100 m³/s) økte vanntemperaturen svakt med vannføring igjen. Denne effekten kan skyldes at små vassdrag typisk finnes høyere til fjells enn store lavlandsvassdrag.

Det var også en signifikant og ikke-lineær effekt av innsjøandel på midlere sommervanntemperatur ($p < 0,001$; **Figur 1E**). Effekten var unimodal, der elver med en middels innsjøandel (ca. 5–10 %) hadde høyere sommervanntemperatur enn elver med liten eller stor innsjøandel. Våre data kan ikke besvare hva dette skyldes, men en hypotese er som følger: Ved lav innsjøandel er oppholdstiden i innsjøer kort og oppvarmingseffekten begrenset. Ved middels innsjøandel øker oppholdstiden tilstrekkelig til at overflatevannet varmes opp av solinnstråling og lufttemperatur. Ved høy innsjøandel er det sannsynlig at innsjøene er store og/eller dype. Disse har en potensielt dempende effekt på temperaturen ved at vannet sirkulerer og avkjøles, samt at de store vannmassene tar lang tid å varme opp etter vørsirkulasjonen. Dette kan jevne ut sesongvariasjonen og holde vanntemperaturen lavere enn lufttemperaturen skulle tilsi. Effektens styrke og retning vil avhenge av innsjøenes størrelse og dybde, noe som ikke fanges opp av innsjøandel alene. Lignende ikke-lineære effekter er rapportert i studier som viser at innsjøer både kan forsterke og dempe elvetemperaturer avhengig av oppholdstid, lagdeling og størrelse (se f.eks. Carlson & Poole 2021).

Til sist var det en signifikant ($p < 0,001$) negativ effekt av breddegrad, der elver i nord jevnt over var kaldere enn elver i sør, gitt samme lufttemperatur, snøsmelting og vannføring. Det er uklart hva denne effekten skyldes, men den kan være relatert til breddegradsavhengige forskjeller i solinnstråling og solhøyde, som påvirker hvor effektivt vannmassene varmes opp.



Figur 3. Predikert sammenheng mellom gjennomsnittlig vanntemperatur fra juni til august og A) gjennomsnittlig lufttemperatur i nedbørfeltet fra juni til august (°C); B) gjennomsnittlig snøsmelting i nedbørfeltet fra juni til august (mm); C) gjennomsnittlig vannføring fra juni til august (m^3/s) på log10-skala; D), % bre i nedbørfeltet og E) % innsjø i nedbørfeltet. Alle variabler er signifikante ($p < 0,001$), utenom bredekning ($p = 0,2$).

Tabell 2. Resultater fra generalisert additiv modell (GAM) der middelvanntemperatur om sommeren (juni–august) ble modellert som funksjon av gjennomsnittlig lufttemperatur i nedbørfeltet, gjennomsnittlig snøsmelting i nedbørfeltet, gjennomsnittlig vannføring ved målestasjonen, isbreandel (%) og innsjøandel (%) i nedbørfeltet og breddegrad ved målestasjonen. Lufttemperatur, snøsmelting og breddegrad ble modellert som parametriske ledd med lineære effekter, mens de andre variablene ble modellert som glatte funksjoner (splines), da effekten ikke var lineær. For parametriske koeffisienter er estimat = koeffisient for lineær effekt; SE = standardfeil for koeffisienten; t = t-verdi; p = p-verdi for koeffisient = 0. For glatte ledd er edf = effektive frihetsgrader, der edf nær 1 indikerer tilnærmet lineær sammenheng; F = F-verdi og p = p-verdi for den glatte kurven bidrar til å forklare variasjonen i vanntemperatur. Justert $R^2 = 0,809$; forklart devians = 82 %, n = 240.

Parameter				
Parametriske ledd	Estimat	SE	t	p
Intercept	13,058	2,025	6,45	< 0,001
Lufttemperatur (mean)	0,775	0,068	11,33	< 0,001
Snøsmelting (mean)	-0,228	0,039	-5,91	< 0,001
Breddegrad	-0,127	0,027	-4,66	< 0,001
Glatte ledd	edf		F	p
s (Isbreandel %)	1,00		1,97	0,162
s (Innsjøandel %)	5,33		8,68	< 0,001
s (\log_{10} (Vannføring))	4,28		3,01	0,009

3.2.1. Resultater fra lite regulerte vassdrag

Når regresjonsanalysen over ble gjentatt kun med data fra 70 elver med ingen eller minimal effekt av regulering på temperatur (se metoder), så vi i all hovedsak de samme trendene som i det fulle datasettet (**Vedleggfigur 2; Vedleggstabell 1**). Parameterverdier og stigningstall var sammenliknbare og pekte i samme retning. Forklart devians i vanntemperatur var imidlertid noe høyere for uregulerte elver (94%) sammenliknet med det fulle datasettet (82%), noe som var forventet ettersom regulering vil påvirke variasjonen i vanntemperatur bl.a. gjennom magazineffekter, endret vannføring og overføringer mellom nedbørfelt.

3.3 Hvordan responderer vanntemperatur på lufttemperatur, og hvordan påvirkes denne sammenhengen av elve- og nedbørfeltkarakteristikker?

Under beskrives resultatene av analysen av relative avvik i vanntemperatur (z-scores) og hvordan disse påvirkes av relative avvik for andre variabler som snøsmelting om sommeren og vannføring. I tillegg beskrives det hvordan lufttemperatureffekten påvirkes av variabler som andel isbre og innsjø i nedbørfeltet. Analysen skiller seg dermed fra kap. 3.2, der vi analyserte hvordan absolutt-temperaturen varierer mellom ulike elver og nedbørfelt. Med andre ord undersøker vi her hva som gjør at en elv blir varmere eller kaldere enn normalt i en gitt periode, og hvordan den responderer på varme perioder og hetebølger, ikke hvorfor noen elver generelt er varmere eller kaldere enn andre (som i kap. 3.2).

Regresjonsanalysen av z-score for vanntemperatur om sommeren (juni–august) viste sterkt signifikante effekter av z-score for lufttemperatur, anomali for snøsmelting og z-score for vannføring (**Tabell 3**). Effekten av z-score for nedbør var ikke signifikant ($p > 0,05$).

Lufttemperatur var den sterkeste prediktoren for vanntemperatur ($\beta = 0,580$, $p < 0,001$) og indikerer at en uke med ett standardavvik over normal lufttemperatur i gjennomsnitt har 0,58 standardavvik over normal vanntemperatur. Månedsvise analyser viste at denne effekten var ganske konstant fra mai til august (**Vedleggstabell 2**).

Vannføring ($\beta = -0,166$, $p < 0,001$) og snøsmelting ($\beta = -0,041$, $p < 0,001$) var begge signifikant negativt relatert til vanntemperatur. Uker med over snittet høy vannføring og snøsmelting hadde dermed kaldere vann enn normalt, i tråd med effekter av kaldt smeltevann. Nedbør var ikke signifikant ($p > 0,05$), noe som kan reflektere at effekten av nedbør på vanntemperatur er indirekte og ofte forsinket via avrenning, og dermed vanskeligere å fange opp på samme tidssteg. I tillegg er nedbør og vannføring korrelert, slik at effekten av nedbør delvis absorberes av vannføringsvariabelen

Tabell 3. Resultater fra den beste lineære mixed effects-modellen for z-score for ukentlig vanntemperatur (juni–august). Den endelige modellen inneholder kun signifikante effekter. Forklarsvariabler er z-score for lufttemperatur, z-score for log(vannføring), anomali for snøsmelting om sommeren, standardisert nedbørfeltareal og standardisert innsjøandel, samt interaksjoner mellom z-score for lufttemperatur og henholdsvis snøsmelting, innsjøandel og nedbørfeltareal. Modellen inkluderer en stasjonsspesifikk tilfeldig helning for lufttemperatur og AR(1)-korrelasjonsstruktur innen stasjon \times år for å håndtere temporal autokorrelasjon. β = regresjonskoeffisient; SE = standardfeil; t = t-verdi; p = p-verdi for koeffisient = 0; df = frihetsgrader. Nedbørfeltareal og innsjøandel er standardisert basert på stasjonsnivå ($n = 240$ stasjoner), slik at referansepunktet tilsvarer en elv med gjennomsnittlig areal (444 km²) og gjennomsnittlig innsjøandel (6 %). Modellen er estimert med maximum likelihood (ML). Antall observasjoner = 59 367; antall stasjoner = 240; AR(1) $\phi = 0,732$; SD tilfeldig helning (lufttemperatur) = 0,184; residual SD = 0,641.

Parameter	β	SE	t	p	df
Faste effekter – hovedeffekter					
Intercept	0,003	0,006	0,48	0,630	59 121
Lufttemperatur (z-score)	0,580	0,012	47,78	< 0,001	59 121
Snøsmelting (anomali)	-0,041	0,001	-42,91	< 0,001	59 121
log(vannføring) (z-score)	-0,166	0,003	-54,35	< 0,001	59 121
log(nedbørfeltareal) (z-score)	0,002	0,006	0,41	0,681	237
Innsjøandel (z-score)	0,002	0,006	0,43	0,668	237
Faste effekter – interaksjoner med lufttemperatur					
\times Snøsmelting (anomali)	-0,006	0,001	-9,49	< 0,001	59 121
\times Innsjøandel (z-score)	-0,037	0,012	-3,06	0,002	59 121
\times log(nedbørfeltareal) (z-score)	-0,048	0,012	-3,97	< 0,001	59 121

Nedbørfeltareal og innsjøandel hadde ingen signifikante hovedeffekter, noe som er forventet ettersom omregning til z-score fjerner eventuelle systematiske temperaturforskjeller mellom elver som disse variablene bidrar til. Variablene hadde imidlertid signifikante interaksjoner med lufttemperatur, og er dermed med på å forklare *responsen* på oppvarming.

Z-score for snøsmelting om sommeren, innsjøandel og nedbørfeltareal hadde alle signifikante interaksjonsledd med z-score for lufttemperatur (**Tabell 3**), noe som betyr at disse variablene påvirket *effekten* av lufttemperatur på vanntemperatur. Lufttemperatureffekten ble dempet av samtidig høy snøsmelting ($\beta = -0,006$, $p < 0,001$), slik at varme uker med mye snøsmelting ga lavere

vanntemperaturrespons enn varme uker uten snøsmelting. Effekten av lufttemperatur var imidlertid sterkt positiv selv ved høy snøsmelting, så effekten ble kun dempet – ikke fjernet.

Månedsvise analyser indikerte at effekten av snøsmelting på oppvarming var signifikant svakere i august enn tidligere på sommeren (**Vedleggstabell 2**). Dette stemmer godt med at snødekket i de fleste nedbørfelt er borte innen sensommeren.

Lufttemperatureffekten var også svakere i elver med høy innsjøandel ($\beta = -0,037$, $p = 0,002$). Dette indikerer at innsjøer demper elvenes direkte respons på atmosfærisk oppvarming. De månedsvise analysene viste imidlertid at denne effekten var positiv i mai, nær null i juni, og signifikant negativ i juli og august (**Vedleggstabell 2**). Den bufrende effekten av innsjøer var dermed størst i den varmeste delen av sommeren. Innsjøer kan dempe oppvarming av elver nedstrøms ved at varmt overflatevann blandes med kaldere bunnvann som følge av vindsirkulasjon. Den absolutte effekten av dette forventes å være størst på sensommeren, når det er stor forskjell i temperatur mellom overflate og bunnvann. Effekter av regulering, for eksempel tapping av kaldt bunnvann, kan også spille inn her.

Det var en negativ interaksjon mellom z-score for lufttemperatur og nedbørfeltareal ($\beta = -0,048$, $p < 0,001$), noe som indikerer at også store nedbørfelt responderer tregere på atmosfærisk oppvarming.

Det var ingen signifikant interaksjon mellom z-score for lufttemperatur og andel isbre i nedbørfeltet så lenge snøsmelting om sommeren var med i modellen. Dette indikerer at effekten av lufttemperatur på vanntemperatur var den samme i elver med breer i nedbørfeltet som i elver uten, og at den dempende effekten av bresmelting i dette datasettet var lav. Dette betyr ikke at bre-elver ikke er kaldere enn andre elver, men at den relative økningen i vanntemperatur (målt i antall standardavvik fra gjennomsnittet; z-score) er like stor i slike elver under varmeperioder. Månedsvise analyser indikerte generelt samme mønster, med ett unntak: I elver med svært høy breandel (> 20 %) var det en relativt sterk og signifikant negativ interaksjon med z-score for lufttemperatur i august. Dette indikerer en buffringseffekt av bresmelting på sensommeren, noe som stemmer godt med at den relative effekten av snøsmelting (se over) avtar betydelig på samme tid av året. Effekten av breer på vanntemperatur er analysert nærmere i kap. 3.4.2.

3.3.1. Resultater fra lite regulerte vassdrag

Når regresjonsanalysen over ble gjentatt kun med data fra 70 elver med ingen eller minimal effekt av regulering på temperatur, så vi i all hovedsak de samme trendene som for det fulle datasettet (**Vedleggstabell 3**). Effektene av relative avvik i lufttemperatur, snøsmelting og vannføring var sammenliknbare med de i **Tabell 3**. For uregulerte elver var det imidlertid ingen signifikant interaksjon mellom lufttemperatur og innsjøandel (eller innsjøareal). Dette kan tolkes som at innsjøer i mindre grad demper oppvarming i uregulerte vassdrag. Vi har ikke kunnet analysere dette videre i denne rapporten, men en hypotese for denne forskjellen er at regulerte vassdrag typisk har større innsjøer eller magasiner oppstrøms som vil kunne dempe oppvarming gjennom sirkulasjon. Videre vil regulering og påslipp av annet enn overflatevann kunne føre til lavere temperatur i elver nedstrøms, i hvert fall i perioder.

3.4 Vanntemperatur i elver under hetebølger

3.4.1. Vanntemperatur og lufttemperatur gjennom varmeperiodene og hetebølgene i 2018 og 2025

Sommeren 2018 var det to svært varme perioder i både Sør-Norge (**Figur 4A**) og Nord-Norge (**Figur 4B**) (se også **Vedleggsfigur 3**; **Vedleggsfigur 4**; og Skaland mfl. 2018). Den første perioden var i mai, hvor lufttemperaturene var høyt over normalen hele måneden. De mest ekstreme temperaturene ble målt i uke 22. Den andre perioden var i juli, hvor det var temperaturer godt over normalen fra uke 26 til uke 30.

Periodene var kun avbrutt av to uker med temperaturer under normalen. I 2025 (**Figur 5**) var det spesielt uke 29 og 30 som hadde de mest ekstreme temperaturene, og det ble registrert hetebølger i alle fylker⁶.

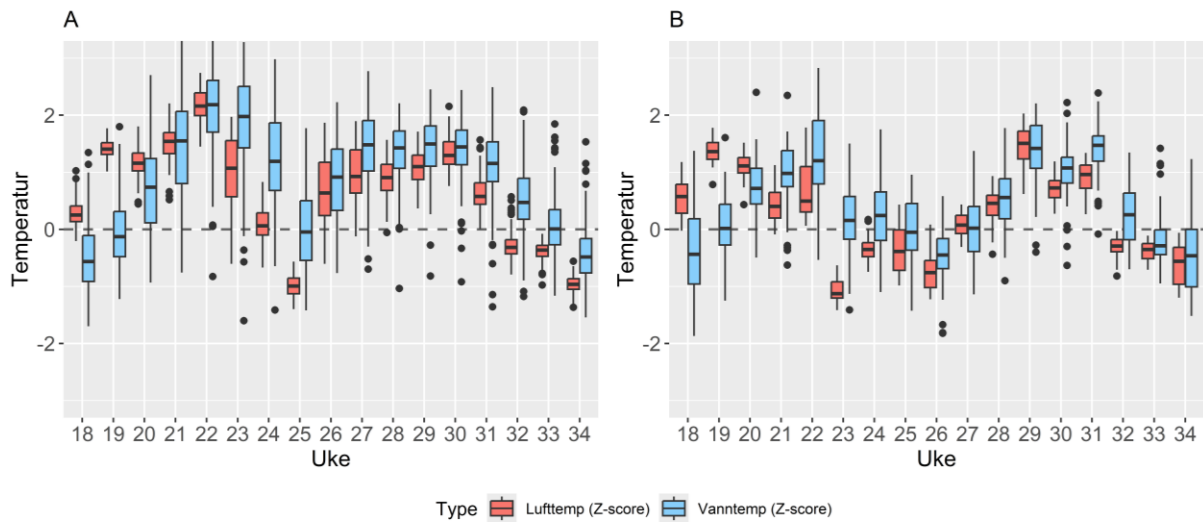
For å si noe om hvor ekstreme temperaturene var, må vi sette z-scorene (**Figur 4** og **Figur 5**) i kontekst. En z-score på 0 betyr at temperaturen er normal for årstiden. Negative verdier indikerer kaldere enn normalt, mens positive verdier indikerer varmere enn normalt. En z-score på 2 betyr at temperaturen er to standardavvik varmere enn normalt for årstiden. Men hvor ekstremt er dette? Antatt at temperaturdataene er noenlunde normalfordelte (noe de var), tilsvarer z-scores på 1, 1,5 og 2 henholdsvis 84-, 93- og 97,5-persentilene. For z-scores på 1,5 og 2 vil man dermed forvente å observere like eller mer ekstreme verdier for den aktuelle perioden (her, uken) i henholdsvis 7 % og 2,5 % av årene. I løpet av en 30-årsperiode tilsvarer dette omtrent to ganger eller sjeldnere enn én gang.

Z-scores for vann- og lufttemperatur fulgte hverandre tett gjennom varmperiodene både i 2018 (**Figur 4**) og 2025 (**Figur 5**). Vanntemperaturen hadde imidlertid et etterslep i forhold til lufttemperaturen både på vei opp og spesielt på vei ned. I Sør-Norge i 2018 (**Figur 4A**) nådde både vann- og lufttemperatur en topp i uke 22, før lufttemperaturen falt til normalt og under normalt nivå i henholdsvis uke 24 og 25. Vanntemperaturene, derimot, holdt seg høyt over normalen (median z-scores fra $> 1-2$) i uke 23 og 24, før de var nede på normalen i uke 25. Samme mønster kan ses etter varmeperioden i juli og i uken(e) etter hetebølgen i juli 2025 (**Figur 5**). Dette henger trolig sammen med vannets store varmekapasitet, og antakelig vil andelen innsjøer i nedbørfeltet oppstrøms være med på å forsterke denne effekten. Analyser av hetebølger i amerikanske elver viser at hetebølger i elvene i snitt varer dobbelt så lenge som hetebølger på land (Sadayappan & Li, 2025).

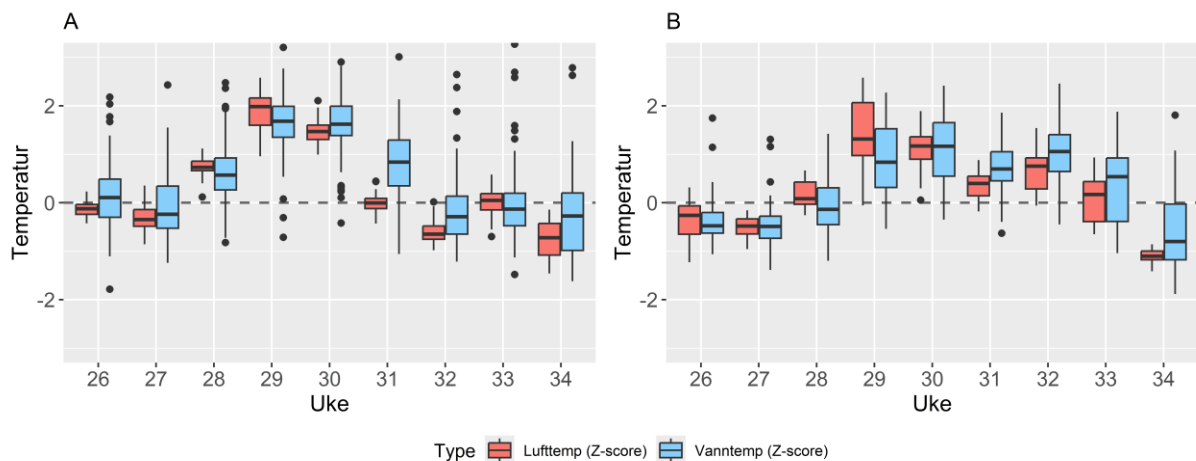
Z-scorene for vann- og lufttemperatur var i samme størrelsesorden i de varmeste periodene (**Figur 4 og 6**), noe som viser at *vanntemperaturen var like høy i forhold til årstidsnormalen som lufttemperaturen*. De mest ekstreme temperaturene ble målt i sørnorske elver under hetebølgen i mai 2018, da median z-scores for både vann- og lufttemperatur var > 2 i uke 22 (**Figur 4A**). I Nord-Norge var det større variasjon mellom elver i denne perioden, men de varmeste elvene hadde også her z-scores rundt 2 (**Figur 4B**). I slutten av juli (uke 29) 2018 var det også svært høye temperaturer, med median z-scores for både vann og luft rundt 1,5 i nord (**Figur 4B**).

Hetebølgen i juli 2025 resulterte også i ekstremt høye vanntemperaturer i Sør-Norge, hvor median z-score i uke 29 var 2 (**Figur 1** **Figur 5A**). I nord var z-scorene noe lavere (median $z = 1,3$), men med større spredning i graden av oppvarming. Omtrent en fjerdedel av de nordnorske vassdragene hadde z-scores > 2 og omtrent en fjerdedel hadde z-scores < 1 .

⁶ <https://www.met.no/nyhetsarkiv/juli-enda-2-8-grader-over-normalen>



Figur 4. Boksploott som viser fordelingen av Z-score for vanntemperatur (blå bokser) og lufttemperatur (røde bokser) i A) Sør-Norge (sør for 63,5 grader nord) og B) Nord-Norge (nord for 63,5 grader nord) fra 30. april (uke 18) til 26. august (uke 34) i 2018.



Figur 5. Boksploott som viser fordelingen av Z-score for vanntemperatur (blå bokser) og lufttemperatur (røde bokser) i A) Sør-Norge (sør for 63,5 grader nord) og B) Nord-Norge (nord for 63,5 grader nord) fra 29. juni (uke 26) til 24. august (uke 34) i 2025.

3.4.2. Temperaturreponser i brepåvirkede vassdrag

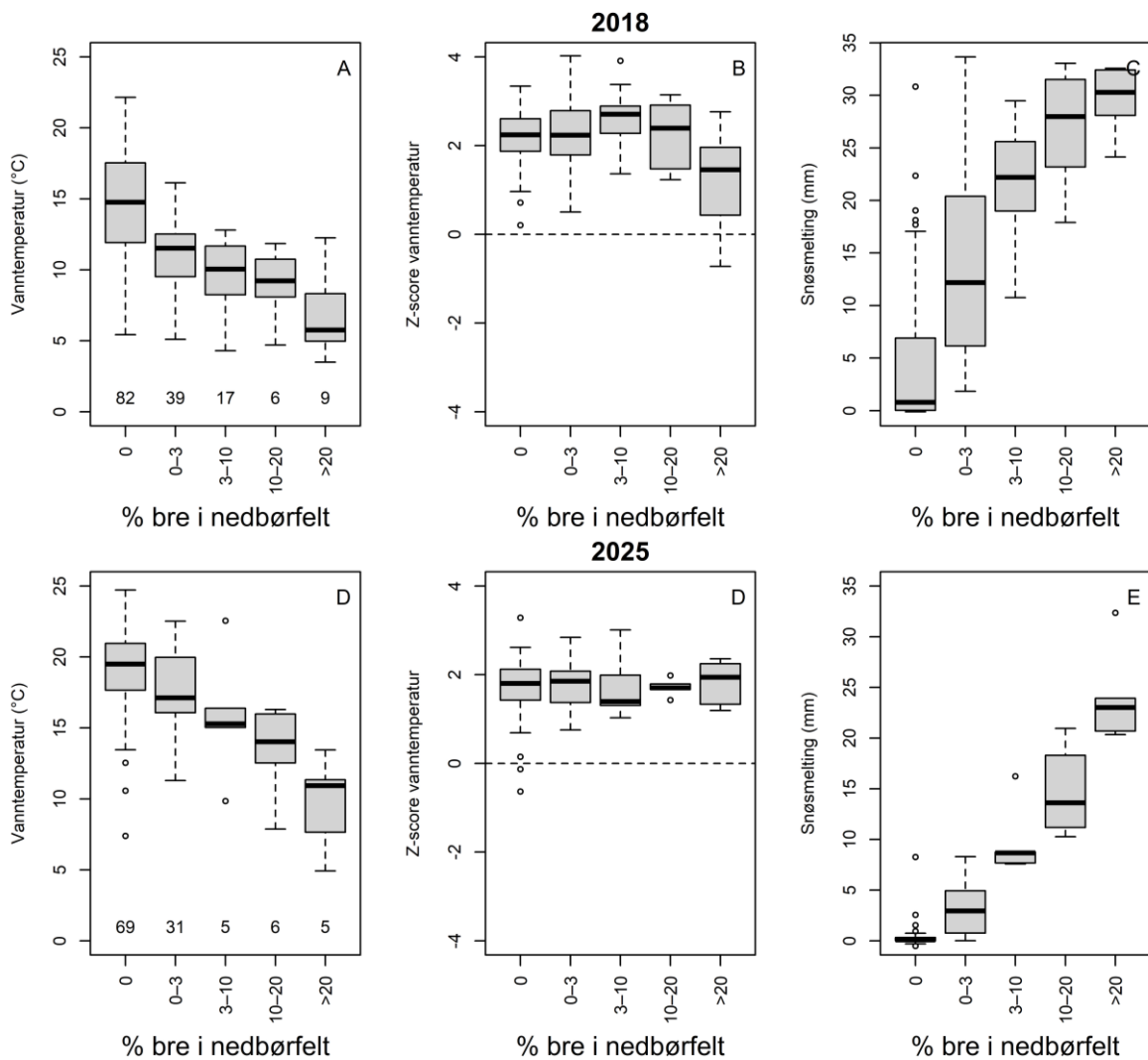
3.4.2.1. Effekt av % bredekning

I vassdrag med isbreer i nedbørfeltet forventes det økt bresmelting under hetebølger, og en hypotese er at dette smeltevannet vil dempe oppvarmingen av elvevannet nedstrøms. Under hetebølgene i mai 2018 og juli 2025 avtok vanntemperaturen signifikant med breandelen (**Figur 6A og D**). Dette skyldes i stor grad at stasjoner med høy breandel typisk ligger høyt over havet og har stor snøsmelting om sommeren (**Figur 6C og F**).

Det relative avviket fra normalen (z-scores) var imidlertid *like ekstremt* for alle grader av brepåvirkning under hetebølgen i 2025 (**Figur 6E**). Median z-scores for alle breklasser lå rundt 2, noe som indikerer ekstremt høy temperatur i forhold til normalen. Under hetebølgen i mai 2018 var det faktisk tendens til

mer ekstrem oppvarming i elver med 3-10 % bre, sammenliknet med elver med lavere bredekning (**Figur 6B**). I de mest brepåvirkede vassdragene (> 20 % bredekning) var det imidlertid signifikant lavere z-scores, som indikerer en viss demping av oppvarmingen her. Disse var imidlertid også svært varme sammenliknet med normalen, med median z-score på ca. 1,5.

Disse resultatene gir delvis støtte til hypotesen om at bresmelting demper oppvarming under hetebølger, men effekten synes i hovedsak å være begrenset til de mest brepåvirkede vassdragene. Selv her oppstår det imidlertid betydelige temperaturavvik relativt til normalen.



Figur 6. Boksploott som viser fordelingen av vanntemperatur (°C), z-score for vanntemperatur og snøsmelting (mm) i elver med ulik prosentandel isbre i nedbørfeltet under hetebølgen i mai 2018 (gjennomsnitt for uke 22; A-C) og hetebølgen i juli 2025 (gjennomsnitt for uke 29; D-F). Antall elver/stasjoner i hver klasse er oppgitt over x-aksen i plott A og D).

3.4.2.2. Temperaturrepons i brepåvirkede og ikke-brepåvirkede vassdrag i Gudbrandsdalslågen/Mjøsa nedbørfelt

I nedbørfeltet til Gudbrandsdalslågen/Mjøsa finner vi de brepåvirkede vassdragene Otta og Sjoa, samt øvre deler av Lågen (oppstrøms Otta), som ikke er brepåvirket (**Tabell 4**). Analyser av temperaturdynamikken i disse under hetebølger kan gi et inntrykk av effekten av bresmelting på temperaturen i ellers ganske sammenliknbare vassdrag.

Det største brepåvirkede vassdraget er Otta, som møter Lågen ved Otta. I **Figur 7** har vi plottet tidsutviklingen i vanntemperatur og z-score for vanntemperatur i Lågen ovenfor Otta (290 moh.; 0,2 % bre) sammen med tilsvarende verdier fra Otta ved Eidefoss (339 moh.; 5,2 % bre). Vi plottet også temperaturutviklingen i Lågen ved Hovdefossen (179 moh.; 2,5 % bre), som ligger i nedre del av Lågen og har 2,5 % bredekning.

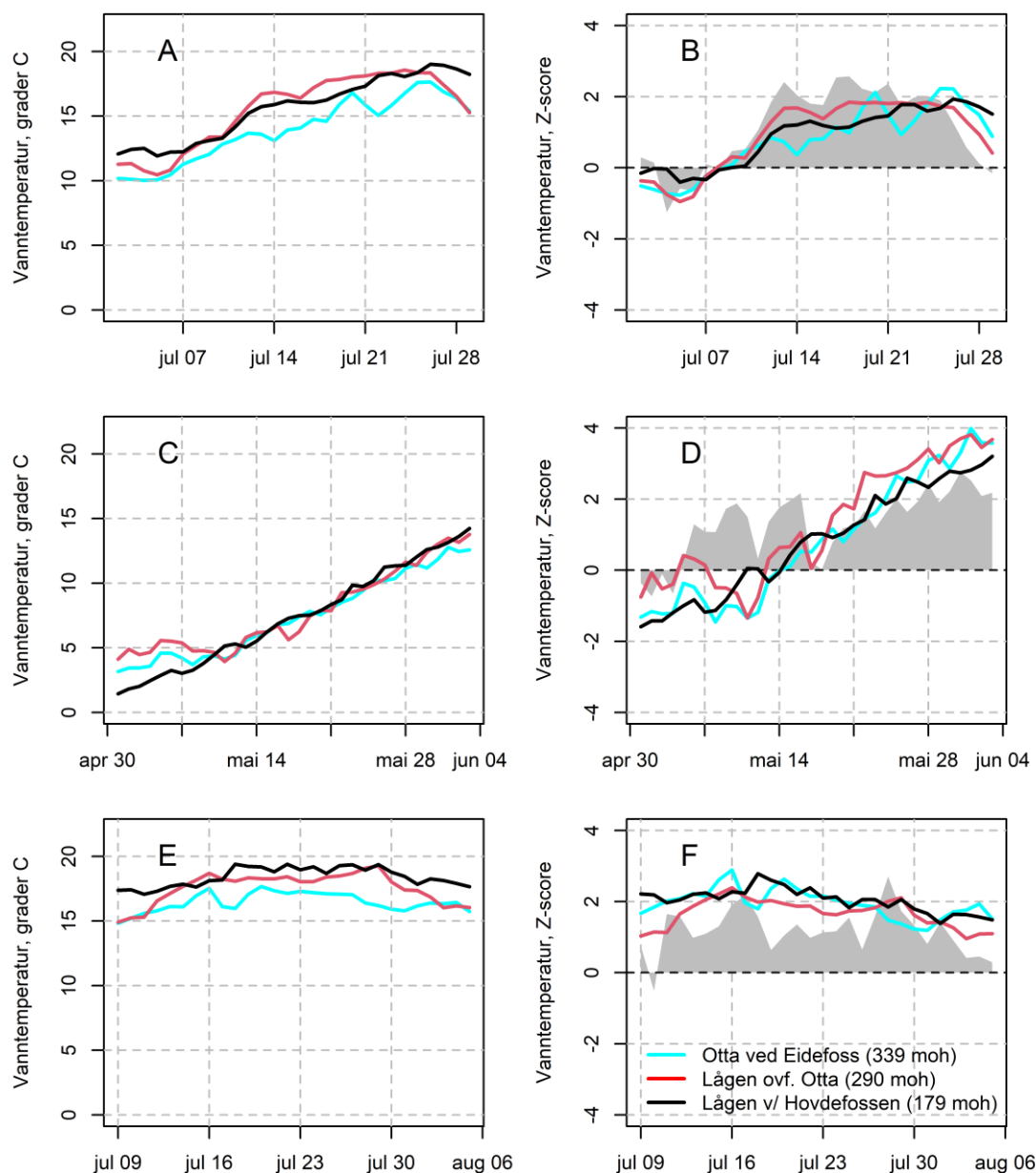
Tabell 4. Oversikt over elve- og nedbørfeltparametere for aktuelle vassdrag i Gudbrandsdalslågens nedbørfelt. Det finnes flere NVE-stasjoner som måler temperatur i disse vassdragene, men stasjonene inkludert her er de som har de mest komplette dataene på vanntemperatur. Middeltemperatur er beregnet for juni–august. Breandel er prosentandel av nedbørfeltarealet dekket av isbre.

Stasjonsnummer	Stasjonsnavn	N	Ø	moh.	Areal (km ²)	Middeltemp sommer (°C)	Breandel (%)
2.656.0	Lågen v/Hovdefossen	61,2903	10,2804	179	11 213	8,4	2,5
2.661.0	Sjoa ovf. Lågen	61,6805	9,5250	280	1 528	8,3	3,8
2.653.0	Lågen ovf. Otta	61,7697	9,5452	290	2 009	8,9	0,2
2.674.0	Otta v/Eidefoss kraftstasjon ovf. Lågen	61,8041	9,3053	339	3 979	7,4	5,2
2.39.0	Sjoa ndf. Gjende	61,4884	8,8199	979	376	6,1	8,7
2.74.0	Leirungsåi	61,4250	8,7198	1 296	33	4,8	13,4

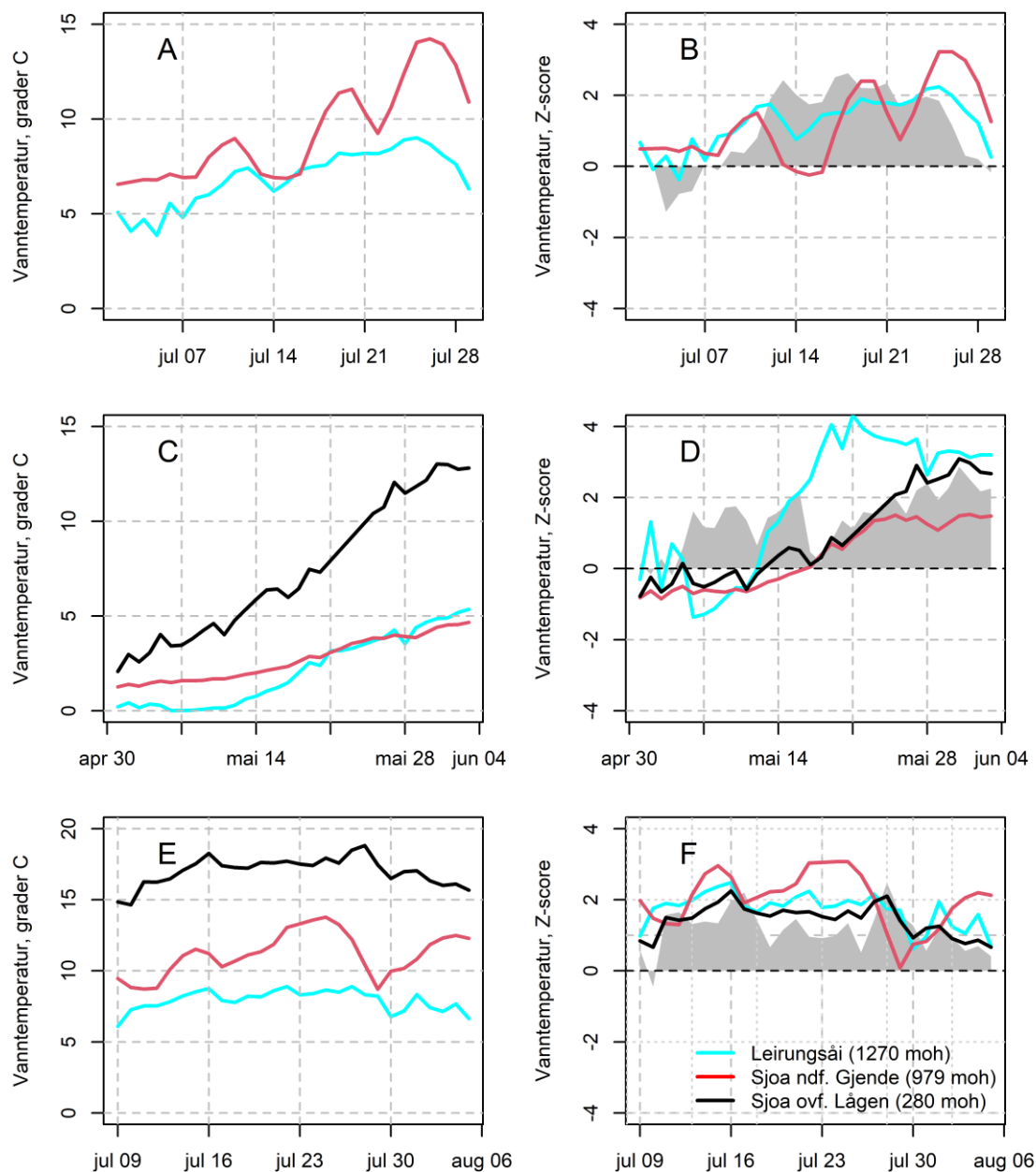
Vanntemperaturen ved de tre stasjonene fulgte hverandre tett under varmeperiodene både i 2018 og 2025 (**Figur 7A, C og E**). Stasjonen i det brepåvirkede Otta-vassdraget hadde i snitt 1-1,5 grader kaldere vann enn Lågen ovenfor Otta i juli 2018 og 2025, mens temperaturene var nær identiske ved alle tre stasjoner i mai 2018. Det var dermed liten effekt av breandel på absolutt vanntemperatur i disse vassdragene. Z-scorene for vanntemperatur (**Figur 7B, D og F**) viser samme mønster; de tre stasjonene hadde samme relative avvik fra normaltemperaturen gjennom varmeperiodene. I juli 2018 og 2025 nådde z-scorene for vanntemperatur verdier rundt 2 på de varmeste dagene. I slutten av mai 2018 nærmet z-scores seg 4 i Otta og Lågen oppstrøms Otta, noe som er ekstremt høyt.

Figur 8 viser tidsutviklingen i temperatur for tre stasjoner i Sjoa-vassdraget. Disse er Leirungsåi (1 296 moh.; 13,4 % bre); Sjoa nedenfor Gjende (979 moh.; 8,7 % bre); og Sjoa ovenfor Lågen (280 moh.; 3,8 % bre; kun data fra 2018). Disse har henholdsvis 13,4, 8,7 og 3,8 % bredekning. Temperaturutviklingen her er relativt lik som i Otta-vassdraget, sett bort fra at absolutt-temperaturene i de høytliggende stasjonene i Leirungsåi og Sjoa nedenfor Gjende naturlig nok er lavere enn lenger ned i vassdraget (**Figur 8A, C og E**). Z-scorene for vanntemperatur viser imidlertid at den relative oppvarmingen er ganske lik for de tre stasjonene (**Figur 8B, D og F**). De mest ekstreme temperaturene i forhold til normalen ble observert i Leirungsåi i mai 2018.

Samlet sett tyder resultatene fra de ulike delnedbørfeltene på at bredpåkirkede og ikke-bredpåkirkede vassdrag avvek like mye fra normaltemperaturen under hetebølgene. Absolutt-temperaturen er naturlig nok lavere i vassdragene høyt til fjells og med stor bredekning, men sammenlikner man stasjonene i Lågen ovenfor Otta (290 moh.), Otta ovenfor Lågen (339 moh.) og Sjoa ovenfor Lågen (280 moh.), så er absolutt-temperaturene ganske like (se også **Figur 9**). Dette indikerer at vannet – uavhengig av om det er smeltevann eller ikke – konvergerer mot sammenliknbare temperaturer på vei ned mot Lågen som følge av oppvarming underveis.



Figur 7. Vanntemperatur (°C) og Z-score for vanntemperatur i Otta ved Eidefoss (339 moh.); Lågen ovenfor Otta (290 moh.); og Lågen ved Hovdefossen (179 moh.) under de hetebølgene i henholdsvis juli 2025 (A og B), mai 2018 (C og D) og juli 2018 (E og F). Z-scoren angir hvor mange standardavvik temperaturen avviker fra normalen. Normaltemperatur for tidsrommet ($z = 0$) er angitt med svart horisontal linje. Det grå, skyggede området i B), D) og F) viser z-score for den gjennomsnittlige lufttemperaturen i nedbørfeltet til Lågen ved Hovdefossen.

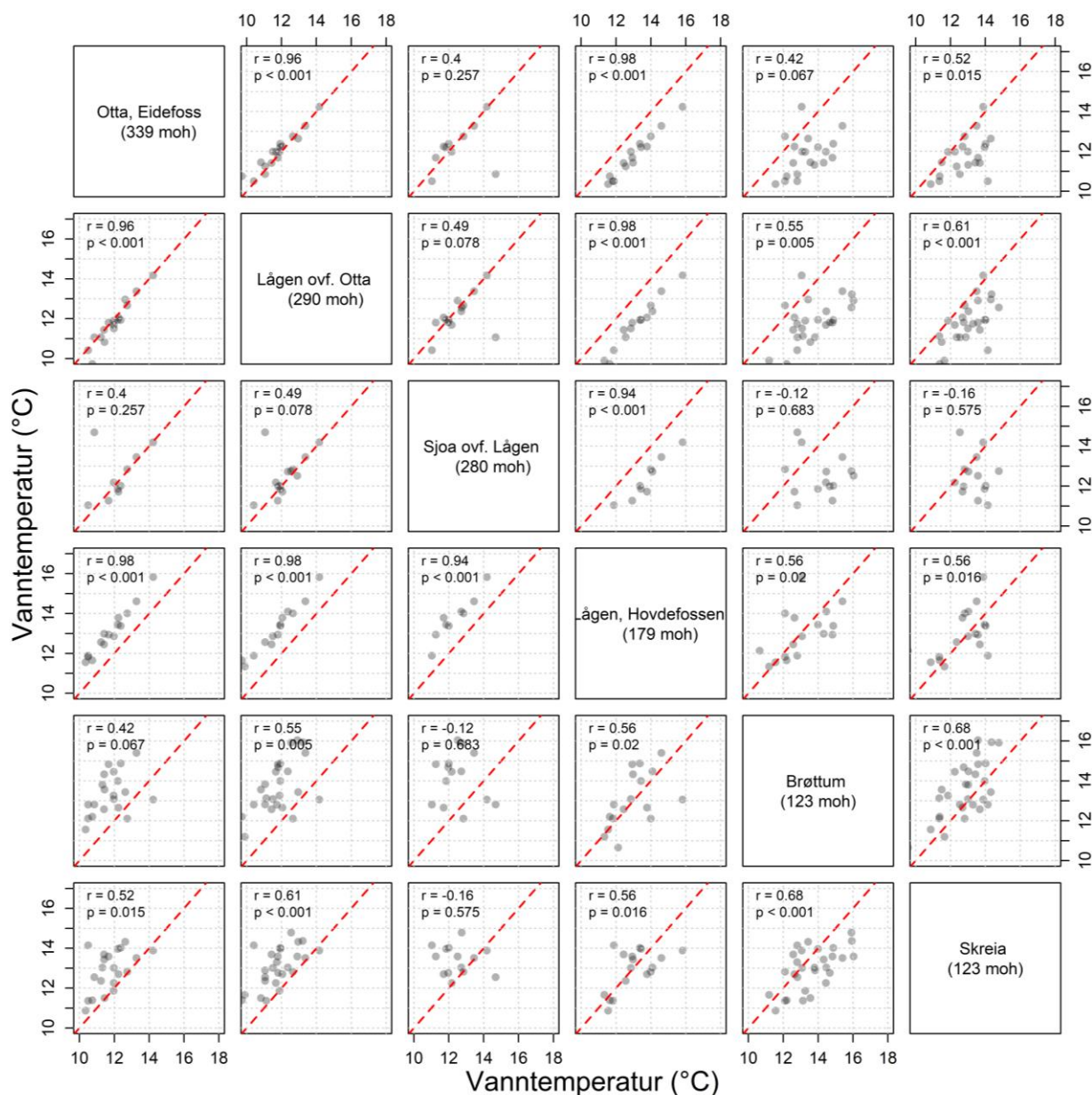


Figur 8. Vanntemperatur (°C) og z-score for vanntemperatur i Leirungsåi (1 270 moh.); Sjoa nedenfor Gjende (979 moh.); og Sjoa ovenfor Lågen (280 moh; data kun fra 2018) under de tre hetebølgene i hhv. juli 2025 (A og B), mai 2018 (C og D) og juli 2018 (E og F). Z-scoren angir hvor mange standardavvik temperaturen avviker fra normalen. Normaltemperatur for tidsrommet ($z = 0$) er angitt med svart horisontal linje. Det grå, skyggede området i B), D) og F) viser z-score for den gjennomsnittlige lufttemperaturen i nedbørfeltet til Sjoa nedenfor Gjende.

Vanntemperaturen i Otta, Sjoa og Lågen er sterkt korrelert (**Figur 9**). Som nevnt over, var også vanntemperaturene i Otta ovenfor Lågen, Lågen ovenfor Otta og Sjoa ovenfor Lågen på samme nivå under hetebølgene. Dette kommer tydelig fram om man sammenlikner middeltemperaturen for juni-august for ulike år, der disse tre stasjonene faller langs 1:1 linjen (**Figur 9**).

Temperaturen øker nedover i Lågen før vannet når Mjøsa. Vanntemperaturen fra 0-10 m målt ved Brøttum nord i Mjøsa og Skreia sentralt i Mjøsa er sammenliknbar med temperaturen i Lågen ved Hovdefossen (middeltemperaturen fra juni-august for disse stasjonene faller langs 1:1-linjen i **Figur 9**). Temperaturen i

Mjøsa (Skreia) er signifikant og relativt sterkt korrelert med temperaturen i alle elvene med unntak av Sjøa ($r = 0,52-0,61$; **Figur 9**).



Figur 9. Sammenheng mellom sommervanntemperatur (gjennomsnitt av juni– august for minst 10 år med data for perioden 1995–2025) ved ulike stasjoner i Otta, Sjøa og Gudbrandsdalslågen, samt Mjøsa (Brøttum og Skreia). Verdiene øverst i venstre hjørne indikerer korrelasjonen (Pearson's r) mellom vanntemperaturen i hvert par av lokaliteter, samt p -verdien for denne. 1:1-linjen er vist i rødt, og punkter som ligger langs denne har samme temperatur.

Samlet sett viser resultatene at både brepåvirkede og ikke-brepåvirkede vassdrag i nedbørfeltet til Gudbrandsdalslågen/Mjøsa responderer svært likt på varmeperioder, med synkron utvikling i vanntemperatur og tilsvarende ekstreme avvik fra normalen under hetebølger. Forskjeller i absolutttemperatur mellom delvassdragene er relativt små og avtar ytterligere nedstrøms, der temperaturene i sideelvene og hovedelva i stor grad konvergerer mot et felles nivå. Dette tyder på at vannmassene, uavhengig av opprinnelse og brepåvirkning, i stor grad varmes opp til sammenliknbare temperaturer før de møtes og transporteres videre nedover i systemet. Den sterke samvariasjonen mellom stasjonene, samt

den gode korrelasjonen med temperaturene i Mjøsa, indikerer at hele vassdraget i praksis opptrer som et sammenkoblet termisk system. Resultatene understreker dermed at lokale forskjeller i brepåvirkning har begrenset betydning for temperaturresponsen under hetebølger, sammenliknet med den regionale drivningen fra atmosfæriske forhold.

3.5 Effekter av framtidige klimaendringer

3.5.1. Effekter av framtidige klimaendringer i Gudbrandsdalslågen/Mjøsas nedbørfelt

Ettersom vanntemperatur er sterkt koblet til lufttemperatur forventes vanntemperaturer også å øke som følge av klimaendringene (van Vliet mfl. 2011, Johnson mlf. 2025). Norsk Klimaservicesenter har laget fylkesvise framskrivninger av klima i Norge, og for Innlandet⁷ forventes både årlig middeltemperatur og middeltemperatur om sommeren å øke med ca. 3 grader fram mot år 2100. Dette vil føre til økende vanntemperaturer i elver i Mjøsas nedbørfelt de kommende tiårene. Det er imidlertid vanskelig å prediktere nøyaktig *hvor mye* vanntemperaturen vil øke, siden den også påvirkes av faktorer som snøsmelting og vannføring. Hvis vi allikevel tar utgangspunkt i sammenhengen mellom lufttemperatur i nedbørfeltet og vanntemperatur (**Tabell 2**), så øker vanntemperaturen med ca. 0,78 grader per grad økning i lufttemperatur om vi sammenlikner nedbørfelt. Om lufttemperaturen øker med 3 grader kan man da se for seg en midlere økning i sommervanntemperatur på ca. 2,3 grader. Å ekstrapolere slike romlige sammenhenger framover i tid («space for time»-analyse) er imidlertid usikkert.

Ifølge Norsk Klimaservicesenter er det forventet en økning i årlig vannføring på ca. 15 % i innlandet fram mot 2100 som følge av økende nedbør. Om sommeren forventes imidlertid vannføringen å *avta til tross for økende nedbør*, fordi snøsmeltingen blir ferdig tidligere og det fordampes mer. På sikt forventes også mindre snø. I tillegg minker breene og bidraget til vannføring fra bresmelting vil etter hvert gå ned. Redusert snøsmelting og vannføring sommerstid vil gi større grad av oppvarming; våre analyser viser sterkt signifikant dempende effekter av disse to variablene på oppvarming (se kap. 3.3). I lys av dette kan man dermed forvente en betydelig oppvarming av elvene i disse områdene fra mot år 2100. Dette vil også påvirke temperaturen i Mjøsa, men ettersom Mjøsa er stor og dyp og har med store og vannmasser med kaldt vann under termoklinen, så er det ikke nødvendigvis slik at Mjøsas temperatur vil øke tilsvarende. Mjøsas respons på klimaendringer vil sikrere kunne avdekkes ved hjelp av hydrodynamisk modellering, der faktorer som sirkulasjon, sjiktning/vertikalfordeling av temperatur og oppholdstid tas hensyn til.

3.6 Tiltak for å styrke vassdragsøkosystemers resiliens i møte med oppvarming

Johnson mfl. (2024) sammenfatter og diskuterer effekter av økende vanntemperatur på økosystemer i elver. I artikkelen beskrives også ulike tiltak som kan bidra til at økosystemene er best mulig rustet i møte med stadig økende- og mer ekstreme temperaturer. Slik motstandsdyktighet og evne til å tilpasse seg endringer, kalles gjerne for *resiliens*.

Et mulig effektivt tiltak er å sikre eller eventuelt gjenopprette funksjonell kantvegetasjon langs elvebredden. Trær og busker reduserer direkte solinnstråling mot vannflaten, og studier viser at elver med trær langs bredden i gjennomsnitt har lavere middel- og maksimumstemperatur enn elver uten. Treplanting er et tiltak som kan gi signifikante effekter, men det må gjøres på rett måte og på rett sted i vassdraget (Dugdale mfl. 2024).

⁷ <https://klimaservicesenter.no/kss/klimaprofiler/innlandet>

Tilgang på kaldtvannsrefugier er også viktig (Meija mfl. 2023). Dype kulper eller områder med grunnvannspåvirkning vil typisk ha lavere temperaturer også under varmeperioder, og laksefisk og andre kaldtvannskrevende arter kan søke til slike områder for å regulere temperaturen. Variasjonen i vanntemperatur kan være stor, og i Lågendeltaet er det f.eks. om sommeren målt opp til 15 graders forskjell (men mer typisk 5–10 graders forskjell) mellom lokaliteter med ulik grunnvannspåvirkning og grad av tilknytning til hovedelva (Myrvold 2024). Forekomsten av slike områder bør derfor kartlegges for å sikre at de tas vare på ved eventuelle inngrep (Meija mfl. 2023).

Også sidevassdrag eller strekninger høyere opp i vassdraget med lavere temperatur kan fungere som temporære kaldtvannsrefugier. For at organismer skal kunne utnytte slike områder når temperaturen stiger, må det være god konnektivitet og fravær av vandringshindre.

Restaureringstiltak som fremmer lateral tilkobling til flomsletter, også ved lave vannføringer, kan være gunstig. Dette kan gi bedre kobling til grunnvannskilder, samt økt habitatdiversitet og områder med skygge. Å sikre av tilstrekkelig (minste)vannføring er også et relevant tiltak, ettersom perioder med lav vannføring gir raskere oppvarming – noe som også ble vist i vår analyse.

4 Sammendrag og konklusjon

I denne rapporten har vi analysert vanntemperaturer i norske elver om sommeren. Analysen er basert på et landsdekkende datasett sammenstilt fra NVEs databaser. Dataene ble kvalitetssikret og koblet med informasjon om nedbørfeltkarakteristika samt tidsserier for lufttemperatur og modellert vannføring og snøsmelting om sommeren. Det filtrerte datasettet inneholdt vanntemperaturdata fra 240 stasjoner med minst 10 års komplette sommerdata i perioden 1995–2025. Stasjonene dekker hele landet og representerer et bredt spenn i hydrologiske, klimatiske og geografiske forhold. Et datasett fra 70 elver med ingen eller minimal effekt av regulering på vanntemperatur ble analysert med samme metodikk for å avdekke forskjeller mellom uregulerte og andre vassdrag.

Resultatene viser at gjennomsnittlig vanntemperatur i norske vassdrag om sommeren i stor grad styres av lufttemperaturen, med en sterk og lineær sammenheng mellom midlere lufttemperatur i nedbørfeltet og midlere vanntemperatur. Samtidig påvirkes vanntemperaturen av nedbørfeltkarakteristika. Store elver var varmere enn små elver, noe som trolig er relatert til høyde over havet, der elver med stor vannføring typisk ligger i lavlandet. Elver i nedbørfelt med stor snøsmelting om sommeren hadde vesentlig lavere sommertemperaturer, og gitt at snøsmelting var med som forklaringsvariabel, var det ingen signifikant forskjell i temperatur mellom elver med ulik andel isbre i nedbørfeltet. Gitt ellers like forhold, var elver i Nord-Norge kaldere enn elver i Sør-Norge. Resultatene fra uregulerte elver pekte i samme retning.

Analysene av relative avvik fra årstidsnormalen viser at sommervanntemperatur responderer tett på variasjoner i lufttemperatur over tid, der uker med over snittet høy lufttemperatur også hadde over snittet høy vanntemperatur. Motsatt hadde uker med over snittet høy snøsmelting om sommeren og over snittet høy vannføring kaldere vann enn normalt. Snøsmelting reduserer lufttemperaturresponsen, men selv i uker med relativt høy snøsmelting var effekten av lufttemperatur sterkt positiv. Snøsmelting om sommeren demper altså oppvarmingen noe, men stopper den ikke.

Effekten av lufttemperatur på vanntemperatur var uavhengig av andelen isbre i nedbørfeltet. Under varmeperioder ble altså elver med høy andel isbre i nedbørfeltet varmet opp like mye i forhold til normalen som elver uten breer. Men her var det ett unntak: I elver med svært høy breandel (> 20 %) var det en signifikant demping av oppvarmingen i august. Da var også effekten av snøsmelting vesentlig svakere.

Dette indikerer økende betydning av smeltevann fra breer på sensommeren, noe som stemmer godt med at snøsmeltingen da er minimal i de fleste nedbørfelt. Effekten av lufttemperatur ble dempet i elver med høy andel innsjøer i nedbørfeltet i juli og spesielt i august. Dette viser at innsjøer bidrar til å redusere temperaturen i elvene nedstrøms på sensommeren, trolig som følge av blanding med kaldere dypvann. Resultatene fra uregulerte elver viste de samme trendene, med unntak av at den dempende effekten av innsjøer oppstrøms ikke var statistisk signifikant.

Under hetebølgene sommeren 2018 og juli 2025 var det ekstremt høye vanntemperaturer i elver over hele landet. I de varmeste periodene var både vann- og lufttemperatur ca. to standardavvik høyere enn normalt, noe som statistisk sett tilsvarer hendelser som vil forekomme sjeldnere enn én gang hvert 30. år. Vann- og lufttemperaturen fulgte hverandre tett, men vanntemperaturen viste et etterslep og holdt seg høy uka etter at lufttemperaturen normaliserte seg. Dette er til en viss grad forventet som følge av vannets varmekapasitet, spesielt for vassdrag med innsjøer i nedbørfeltet oppstrøms, som forlenger oppholdstiden på vannet. Resultatene viser dermed at varmeperioder gir både sterke og vedvarende temperaturøkninger i elvene, noe som også er vist i ny forskning fra elver i Nord-Amerika (Sadayappan & Li 2025).

Vanntemperaturen under hetebølgene avtok kraftig med andel isbre i nedbørfeltet, noe som kan forklares med at elver med høy bredekning typisk ligger høyere til fjells og i tillegg har stor snøsmelting om sommeren. Vanntemperaturen i brepåvirkede vassdrag var imidlertid *like høy i forhold til normalen for årstiden*, med ca. to standardavvik høyere temperaturer enn normalt. Dette innebærer at bresmelting har begrenset evne til å forhindre ekstreme temperaturavvik.

Resultatene fra stasjoner i de brepåvirkede Otta- og Sjøa-vassdragene, samt i øvre deler av Lågen, som ikke er brepåvirket, viste de samme trendene. Alle stasjoner var like varme i forhold til normalen, selv om stasjonene med høyest bredekning hadde lavere absolutte temperaturer. Imidlertid var vanntemperaturen i nedre del av Otta (340 moh.), Lågen før samløpet med Otta (290 moh.), samt Sjøa før samløpet med Lågen (280 moh.), like høy og uavhengig av bredekning. Dette indikerer at den gjenværende nedkjølende effekten av smeltevann fra breer er minimal når elvene møter Lågen. Antakelig er tiden det tar for vannet å renne ned i lavlandet tilstrekkelig til at vannet varmes opp til sammenliknbare temperaturer uavhengig av bresmelting eller ikke. Våre resultater antyder dermed at snø og snøsmelting om sommeren er viktigere for nedkjøling enn bresmelting, kanskje med unntak av sent på sommeren. Bresmelting bidrar imidlertid til større *vannføring* om sommeren, noe som også vil påvirke vanntemperaturen.

Mjøsas middeltemperatur om sommeren (0-10 m) var sammenliknbar med og godt korrelert med temperaturen i nedre del av Lågen. Stor andel høyfjell og mye snøsmelting gjennom sommeren i nedbørfeltet bidrar til at Mjøsa tilføres relativt kaldt vann gjennom sommeren. Mjøsa er imidlertid svært dyp, med store volumer kaldt vann under termoklinen. Dette gjør at vanntemperaturen i Mjøsa i stor grad også styres av vind og strømmer, som bidrar til blanding av overflatelaget med kaldere bunnvann. I store innsjøer som Mjøsa vil også vindretning kunne være styrende for temperaturen lokalt, der fralandsvind typisk gir oppstrømning av kaldt bunnvann, mens pålandsvind gir oppstuvning av varmere overflatevann.

Resultatene har implikasjoner for framtidige klimaendringer, der både midlere vanntemperaturer og frekvensen av hetebølger vil øke. I Innlandet ventes det at sommertemperaturen vil øke med rundt 3 grader fram mot år 2100, samtidig som at sommervannføringen vil avta fordi snøsmeltingen blir ferdig tidligere og fordampingen øker. Breene vil minke og bidraget til vannføring fra bresmelting vil etter hvert avta. Samlet sett vil dette kunne gi betydelig høyere sommervanntemperaturer i Gudbrandsdalslågen/Mjøsas nedbørfelt. Generelt innebærer økende temperatur høyere risiko for termisk stress hos vannlevende organismer, redusert habitatkvalitet for kaldevannarter og økt behov for tiltak

som sikrer at elvøkosystemer er best mulig rustet mot framtidig oppvarming. Slike tiltak inkluderer kantsoner som skaper skygge, tilgang til kaldtvannsrefugier som grunnvannspåvirkede områder og dype kulper, tilstrekkelig (minste)vannføring og restaurering for å sikre lateral og longitudinal konektivitet.

5 Referanser

Bakke, S. J., Ionita, M. & Tallaksen, L. M. 2020. The 2018 northern European hydrological drought and its drivers in a historical perspective, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, pp. 5621–5653, <https://doi.org/10.5194/hess-24-5621-2020>.

Caissie, D. 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 51(8), 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>

Carlson S.P., & Poole G.C., 2021. Describing alpine lake influence on stream network temperatures: A statistical modelling approach. *Hydrological Processes*, 35, e14072. <https://doi.org/10.1002/hyp.14072>

Dokulil, M.T., de Eyto, E., Maberly, S.C. mfl. 2021. Increasing maximum lake surface temperature under climate change. *Climatic Change*, 165, 56. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03085-1>.

Dugdale, S. J., Malcolm, I. A., & Hannah, D. M. 2024. Understanding the effects of spatially variable riparian tree planting strategies to target water temperature reductions in rivers. *Journal of Hydrology*, 635, 131163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131163>

Dyrrdal, A. V., Bakke, S.J., Hanssen-Bauer, I., Mayer, S., Nilsen, I.B., Nilsen, J.E.Ø., Paasche, Ø., Saloranta, T. and Årthun, M. 2025., *Klima i Norge – Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2025*. NCCS-Rapport 1/2025. Oslo, Norsk Klimasevicesenter. <https://hdl.handle.net/11250/3216988>

Gale, M.K., Hinch, S.G. & Donaldson, M.R., 2013. The role of temperature in the capture and release of fish. *Fish and Fisheries*, 14, pp. 1-33. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00441.x>

Gangstø, R., Grinde, L., Tunheim, K., Aaboen, S. 2025. Været i Norge. *Klimatologisk månedsoversikt. Juli 2025*. MET info 7/2025. ISSN 1894-759X.

IPCC, 2021. *Regional Fact Sheet – Europe*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC

Jöhnk, K.D., Huisman, J., Sharples, J., Sommeijer, B., Visser, P.M. & Stroom, J.M. ., 2008. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology*, 14, pp. 495-512. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01510.x>

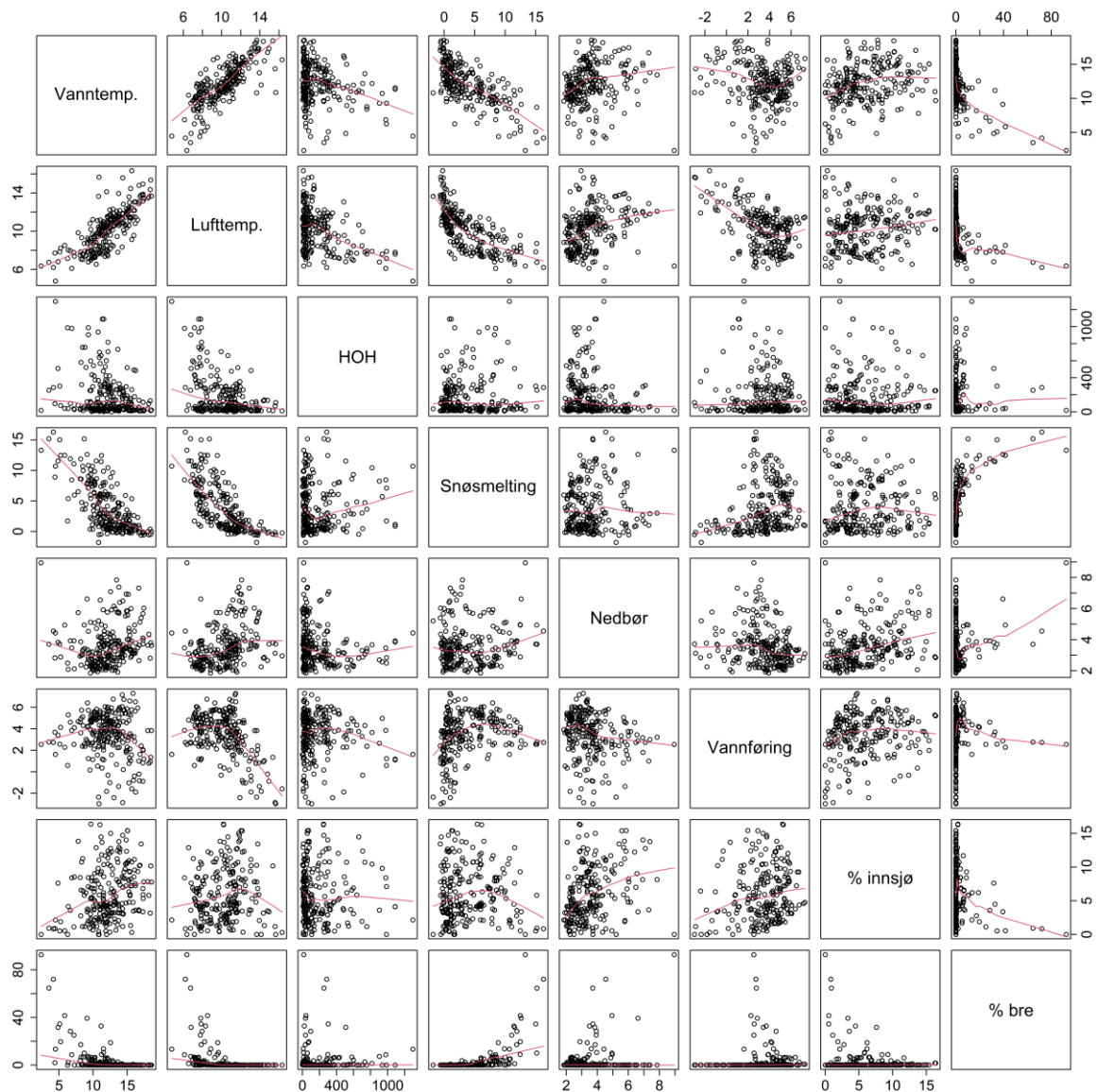
Johnson, Z.C., mfl. 2020. Paired air-water annual temperature patterns reveal hydrogeological controls on stream thermal regimes at watershed to continental scales. *Journal of Hydrology*, 587, 124929.

Johnson, M. F., Albertson, L. K., Algar, A. C., Dugdale, S. J., Edwards, P., England, J., Gibbins, C., Kazama, S., Komori, D., MacColl, A. D. C., Scholl, E. A., Wilby, R. L., de Oliveira Roque, F., & Wood, P. J. 2024. Rising water temperature in rivers: Ecological impacts and future resilience. *WIREs Water*, 11(4), e1724. <https://doi.org/10.1002/wat2.1724>

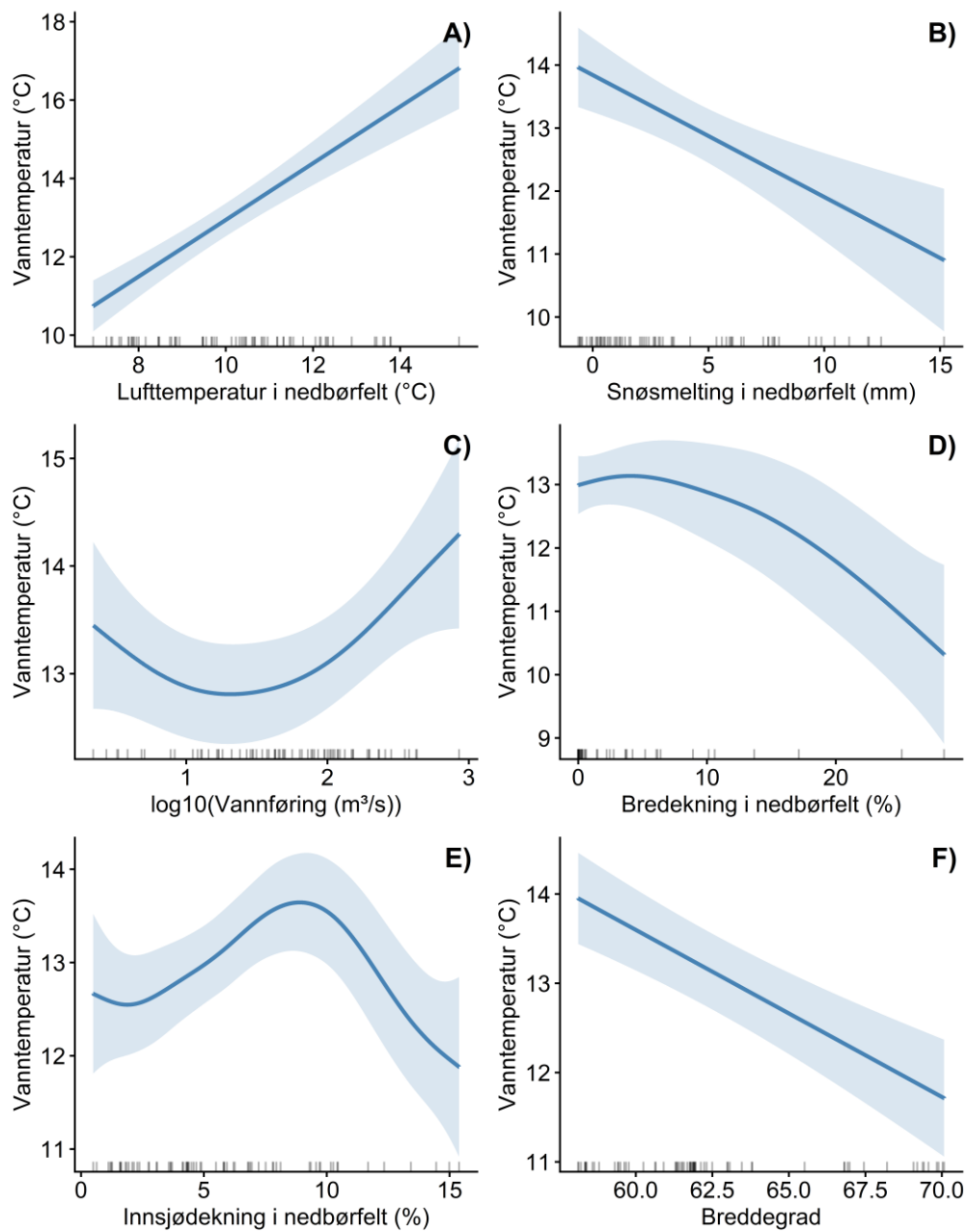
Loerke, E., Pohle, I., Wilkinson, M. E., Rivington, M., Wardell-Johnson, D., & Geris, J. 2023. Long-term daily stream temperature record for Scotland reveals spatio-temporal patterns in warming of rivers in the past and further warming in the future. *Science of The Total Environment*, 890. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164194>

- Mejia, F. H., Ouellet, V., Briggs, M. A., Carlson, S. M., Casas-Mulet, R., Chapman, M., ... & Torgersen, C. E. 2023. Closing the gap between science and management of cold-water refuges in rivers and streams. *Global Change Biology*, 29(19), 5482-5508.
- Myrvold, K. M. 2024. A complete homogenization of water temperatures during widespread flooding. *River Research and Applications*, 40(8), 1621-1625.
- Oliver, E.C.J., Donat, M.G., Burrows, M.T. *mfl.* 2018. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nat Commun.* 9, 1324. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>
- Orr, H. G., Simpson, G. L., des Clers, S., Watts, G., Hughes, M., Hannaford, J., Dunbar, M. J., Laizé, C. L. R., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., & Evans, R. 2015. Detecting changing river temperatures in England and Wales. *Hydrological Processes*, 29, 752-766. <https://doi.org/10.1002/hyp.10181>
- O'Reilly, C.M. *mfl.* 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophys. Res. Lett.*, 42. pp. 10773 - 10781. <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>.
- Sadayappan, K. & Li, L. 2025. Riverine heat waves on the rise, outpacing air heat waves, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 122(39) e2503160122, <https://doi.org/10.1073/pnas.2503160122>.
- Sheather, S. J. 2009. *A modern approach to regression with R*. New York. Springer.
- Skaland, R.G., Colleuille, H., Andersen, A.S.H., Mamen, J., Grinde, L., Tajet, H.T.T., Lundstad, E., Sidselrud, L.F., Tunheim, K., Hanssen-Bauer, I., Benestad, R., Heiberg, H. & Hygen, H.O. 2019. Tørkesommeren 2018. MET info 14/2019. ISSN 1894-759X.
- Thrane, J. E., Økelsrud, A., Skjelbred, B., Kemp, J.L & Aasland, E. (2026). Tiltaksorientert overvåking i vannområde Mjøsa – årsrapport for 2025. (NIVA-rapport 8198-2026). Norsk institutt for vannforskning STI.
- van Hamel, A., Janzing, J. & Brunner, M. I., 2026. River temperature response to atmospheric heatwaves is modulated by discharge and meltwater. *Communications Earth & Environment*, 7(1), 296. <https://doi.org/10.1038/s43247-026-03269-6>
- van Vliet, M. T. H., Ludwig, F., Zwolsman, G. Z., Weedon, G. P., & Kabat, P. 2011. Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow. *Water Resources Research*, 47, WR009198.
- Wanders, N., van Vliet, M. T. H., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & van Beek, L. P. H. (Rens). 2019. High-resolution global water temperature modeling. *Water Resources Research*, 55, 2760–2778. <https://doi.org/10.1029/2018WR023250>

6 Vedlegg



Vedleggsfigur 1. Plottmatrise som viser sammenhengen mellom gjennomsnittlig vanntemperatur (Vanntemp.) om sommeren (juni–august) og andre elv- og nedbørfeltvariabler i de 240 elvene. Lufttemp = middeltemperatur i nedbørfeltet om sommeren (°C); HOH = høyde over havet ved målestasjonen (m); Snøsmelting = gjennomsnittlig modellert snøsmelting i nedbørfeltet om sommeren (mm); Nedbør = gjennomsnittlig modellert nedbør i nedbørfeltet om sommeren (mm); Vannføring = gjennomsnittlig modellert vannføring om sommeren (på log-skala); % innsjø og % bre =: andel av nedbørfeltet som er dekket av henholdsvis innsjøer og isbreer. Glatte regresjonslinjer (loess) er plottet i rødt for å visualisere sammenhengen mellom ulike par av x- og y-variabler.



Vedleggsfigur 2. Resultater fra vassdrag med ingen eller minimal effekt av regulering på vanntemperatur. Predikert sammenheng mellom gjennomsnittlig vanntemperatur fra juni til august og A) gjennomsnittlig lufttemperatur i nedbørfeltet fra juni til august (°C); B) gjennomsnittlig snøsmelting i nedbørfeltet fra juni til august (mm); C) gjennomsnittlig vannføring fra juni til august (m³/s) på log10-skala; D), % bre i nedbørfeltet og E) % innsjø i nedbørfeltet. Alle variabler er signifikante. N = 70.

Vedleggstabell 1. Resultater fra generalisert additiv modell (GAM) der middelvanntemperatur om sommeren (juni–august) i 70 elver med minimal effekt av regulering på vanntemperatur ble modellert som funksjon av gjennomsnittlig lufttemperatur i nedbørfeltet, gjennomsnittlig snøsmelting i nedbørfeltet, gjennomsnittlig vannføring ved målestasjonen, isbreandel (%) og innsjøandel (%) i nedbørfeltet og breddegrad ved målestasjonen. Lufttemperatur, snøsmelting og breddegrad ble modellert som parametriske ledd med lineære effekter, mens de andre variablene ble modellert som glatte funksjoner (splines), da effekten ikke var lineær. For parametriske koeffisienter er estimat = koeffisient for lineær effekt; SE = standardfeil for koeffisienten; t = t-verdi; p = p-verdi for koeffisient = 0. For glatte ledd er edf = effektive frihetsgrader, der edf nær 1 indikerer tilnærmet lineær sammenheng; F = F-verdi og p = p-verdi for den glatte kurven bidrar til å forklare variasjonen i vanntemperatur. Justert $R^2 = 0,93$; forklart devians = 94 %, n = 70.

Parameter				
Parametriske ledd	Estimat	SE	t	p
Intercept	17.818	2.313	7.70	< 0,001
Lufttemperatur (mean)	0.723	0.088	8.24	< 0,001
Snøsmelting (mean)	-0.194	0.049	-3.95	< 0,001
Breddegrad	-0.187	0.033	-5.60	< 0,001
Glatte ledd	edf		F	p
s (Isbreandel %)	2,27		5,99	0,002
s (Innsjøandel %)	4,16		3,42	0,008
s (\log_{10} (Vannføring))	2,45		3,87	0,013

Vedleggstabell 2. Månedsvise mixed effects-modeller for ukentlig vanntemperatur (z-score), mai–august.

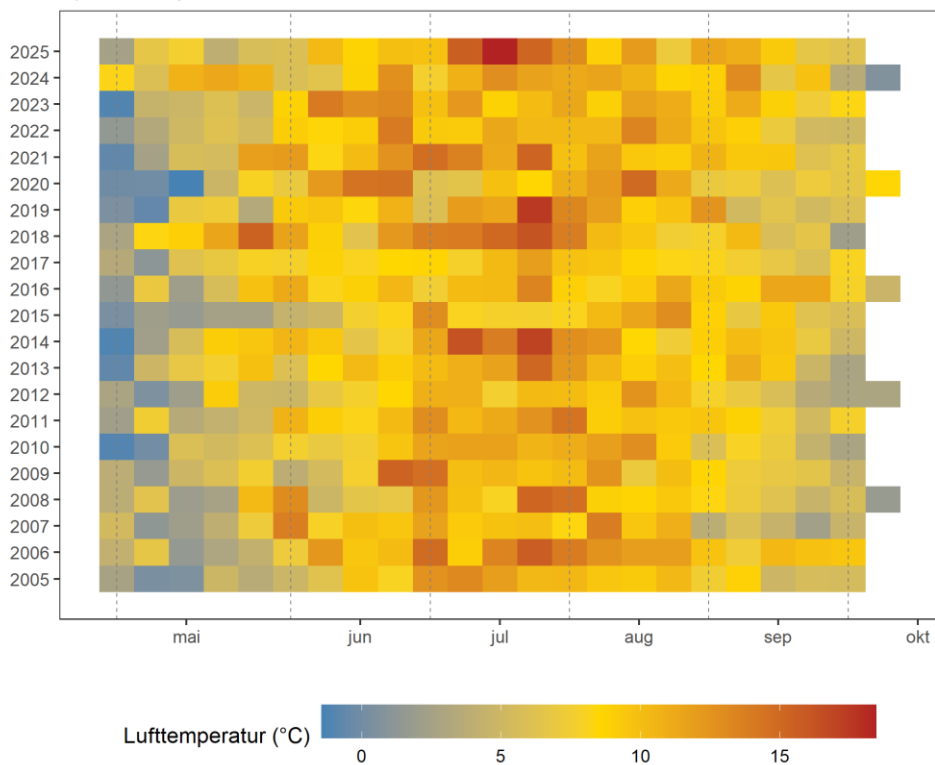
	Mai	Juni	Juli	August
Parameter	β (SE)	β (SE)	β (SE)	β (SE)
Faste effekter – hovedeffekter				
Intercept	0,020 (0,15)	-0,004 (0,68)	-0,003 (0,78)	0,011 (0,30)
Lufttemperatur (z)	0,541 (<0,001)	0,609 (<0,001)	0,580 (<0,001)	0,614 (<0,001)
Snøsmelteanomali	-0,034 (<0,001)	-0,064 (<0,001)	-0,047 (<0,001)	-0,015 (< 0,001)
Vannføring $\log(z)$	-0,190 (<0,001)	-0,172 (<0,001)	-0,193 (<0,001)	-0,176 (< 0,001)
$\log(\text{nedbørfeltareal})$ (z)	-0,001 (0,97)	0,002 (0,81)	0,001 (0,87)	-0,002 (0,84)
Innsjøandel (z)	0,004 (0,68)	-0,001 (0,80)	0,000 (0,88)	0,002 (0,82)
Faste effekter – isbreandel (ref: ingen)				
Lav	0,002 (0,94)	0,000 (0,98)	0,000 (0,77)	0,010 (0,59)
Middels	-0,003 (0,92)	0,014 (0,60)	0,012 (0,97)	0,004 (0,88)
Høy	-0,004 (0,94)	0,013 (0,74)	0,027 (0,57)	-0,009 (0,83)
Svært høy	-0,009 (0,88)	0,059 (0,16)	0,037 (0,81)	-0,031 (0,45)
Interaksjoner: lufttemperatur (z) x isbreandel				
x lav	-0,021 (0,47)	0,100 (0,0015)	-0,009 (0,76)	0,010 (0,78)
x middels	-0,118 (0,0044)	0,151 (<0,001)	0,002 (0,97)	-0,050 (0,32)
x høy	-0,004 (0,95)	0,169 (0,02)	0,042 (0,57)	-0,049 (0,56)
x svært høy	-0,105 (0,087)	0,152 (0,02)	-0,015 (0,81)	-0,393 (< 0,001)
Interaksjoner: lufttemperatur (z) x andre variabler				
x Snøsmelteanomalí	-0,004 (<0,001)	-0,006 (0,001)	-0,005 (<0,001)	-0,001 (0,59)
x Innsjøandel (z)	0,028 (0,02)	-0,008 (0,013)	-0,041 (0,002)	-0,071 (<0,001)
x $\log(\text{nedbørfeltareal})$ (z)	-0,026 (0,037)	-0,052 (0,013)	-0,042 (0,002)	-0,054 (<0,001)

Tilfeldige effekter og modelltilpasning				
SD slope (lufttemp)	0,159	0,179	0,183	0,213
SD residual	0,839	0,641	0,594	0,641
AR(1) Φ_1	0,759	0,722	0,743	0,731
AIC	37 117	27 425	23 976	27 796
Antall obs.	20 111	19 465	19 874	20 028
Antall stasjoner	240	240	240	240

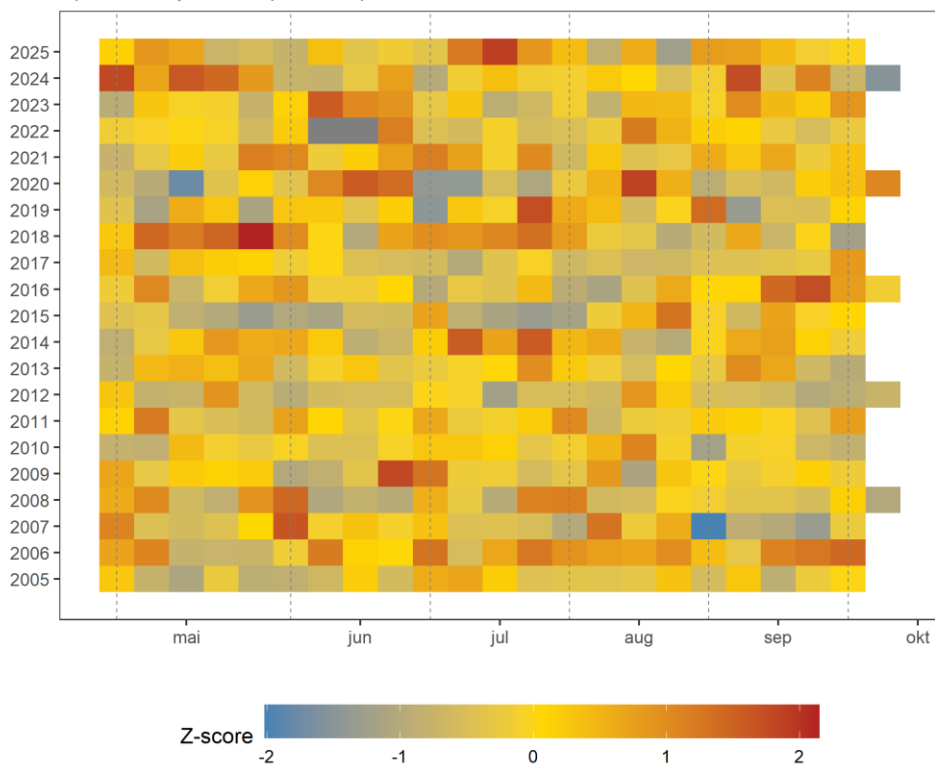
Vedleggstabell 3. Resultater fra den beste lineære mixed effects-modellen for z-score for ukentlig vanntemperatur (juni–august) fra 70 elver med minimal effekt av regulering på vanntemperatur. Den endelige modellen inneholder kun signifikante effekter. Forklaringsvariabler er z-score for lufttemperatur, z-score for log(vannføring), anomali for snøsmelting om sommeren, standardisert nedbørfeltareal og standardisert innsjøandel, samt interaksjoner mellom z-score for lufttemperatur og snøsmelting. Modellen inkluderer en stasjonsspesifikk tilfeldig helning for lufttemperatur og AR(1)-korrelasjonstruktur innen stasjon \times år for å håndtere temporal autokorrelasjon. β = regresjonskoeffisient; SE = standardfeil; t = t-verdi; p = p-verdi for koeffisient = 0; df = frihetsgrader. Nedbørfeltareal og innsjøandel er standardisert basert på stasjonsnivå, slik at referansepunktet tilsvarer en elv med gjennomsnittlig areal (444 km²) og gjennomsnittlig innsjøandel (6 %). Modellen er estimert med maximum likelihood (ML). Antall observasjoner = 21 464; antall stasjoner = 70; AR(1) ϕ = 0,74; SD tilfeldig helning (lufttemperatur) = 0,165; residual SD = 0,62.

Parameter	β	SE	t	p	df
Faste effekter – hovedeffekter					
Intercept	0,006	0,009	0,60	0,550	21 462
Lufttemperatur (z-score)	0,578	0,020	28,76	< 0,001	21 462
Snøsmelting (anomali)	-0,045	0,002	-26,54	< 0,001	21 462
log(vannføring) (z-score)	-0,205	0,005	-42,96	< 0,001	21 462
log(nedbørfeltareal) (z-score)	0,000	0,012	0,03	0,973	67
Innsjøandel (z-score)	0,001	0,009	0,15	0,881	67
Faste effekter – interaksjoner med lufttemperatur					
\times Snøsmelting (anomali)	-0,007	0,001	-6,87	< 0,001	21 462

a) Lufttemperatur

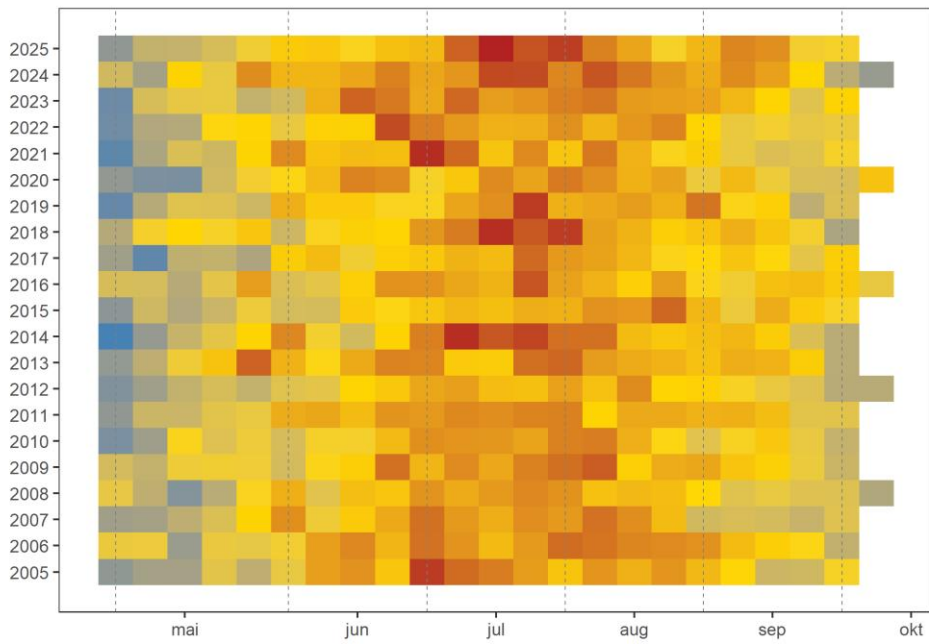


b) Lufttemperatur (z-score)

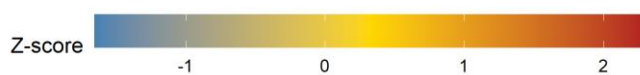
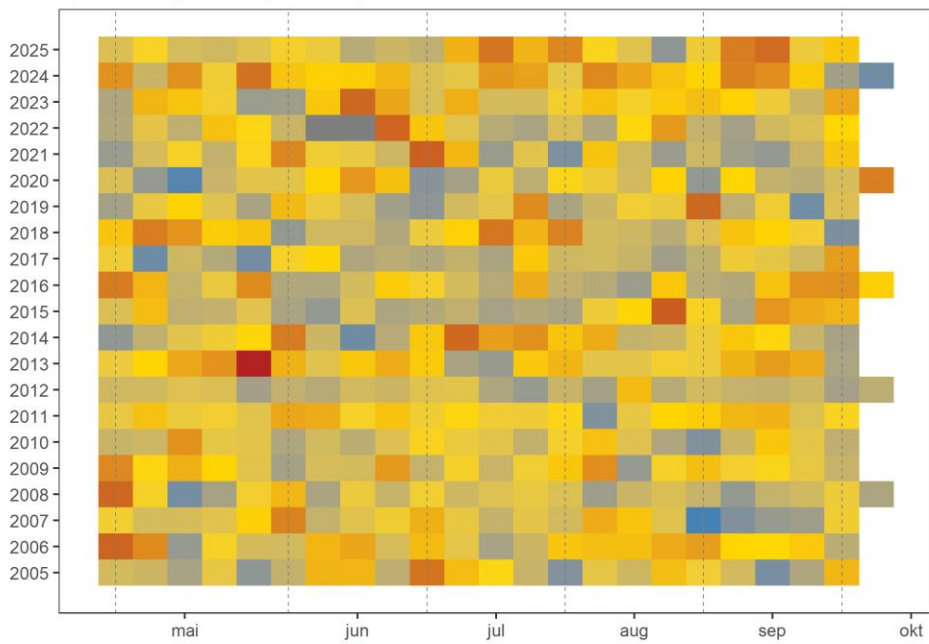


Vedleggsfigur 3. Vanntemperatur og z-score for vanntemperatur per uke for Sør-Norge (sør for 63,5 grader nord) for årene 2005–2025.

a) Lufttemperatur



b) Lufttemperatur (z-score)



Vedleggsfigur 4. Vanntemperatur og z-score for vanntemperatur per uke for Nord-Norge (nord for 63,5 grader nord) for årene 2005–2025.



Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

Norsk institutt for vannforskning STI (NIVA) er Norges viktigste miljøforskningsinstitutt for vannfaglige spørsmål, og vi arbeider innenfor et bredt spekter av miljø, klima- og ressurs spørsmål. Vår forskerkompetanse kjennetegnes av en solid faglig bredde, og spisskompetanse innen mange viktige områder. Vi kombinerer forskning, overvåking, utredning, problemløsning og rådgivning, og arbeider på tvers av fagområder.