

Newborough Warren

Co dzieje się z wodą pod wydrami?

21-letnie badanie wód gruntowych na jednym z najważniejszych nadmorskich terenów wydmych Walii

Hollingham, M. (2026). *Hydrogeological Dynamics, Behavioural Clustering and Management Intervention Analysis at Newborough Warren Coastal Sand Dune Aquifer, Wales*. Wersja robocza, marzec 2026.

Projekt: github.com/newbroman/Newborough_Hydrology

Narzędzia webowe (przeglądarka scenariuszy, prognoza powodziowa):
newbroman.github.io/Newborough_Hydrology

Kontakt: martin.hollingham+nrg@gmail.com | ORCID: 0000-0003-0253-9301

Miejsce

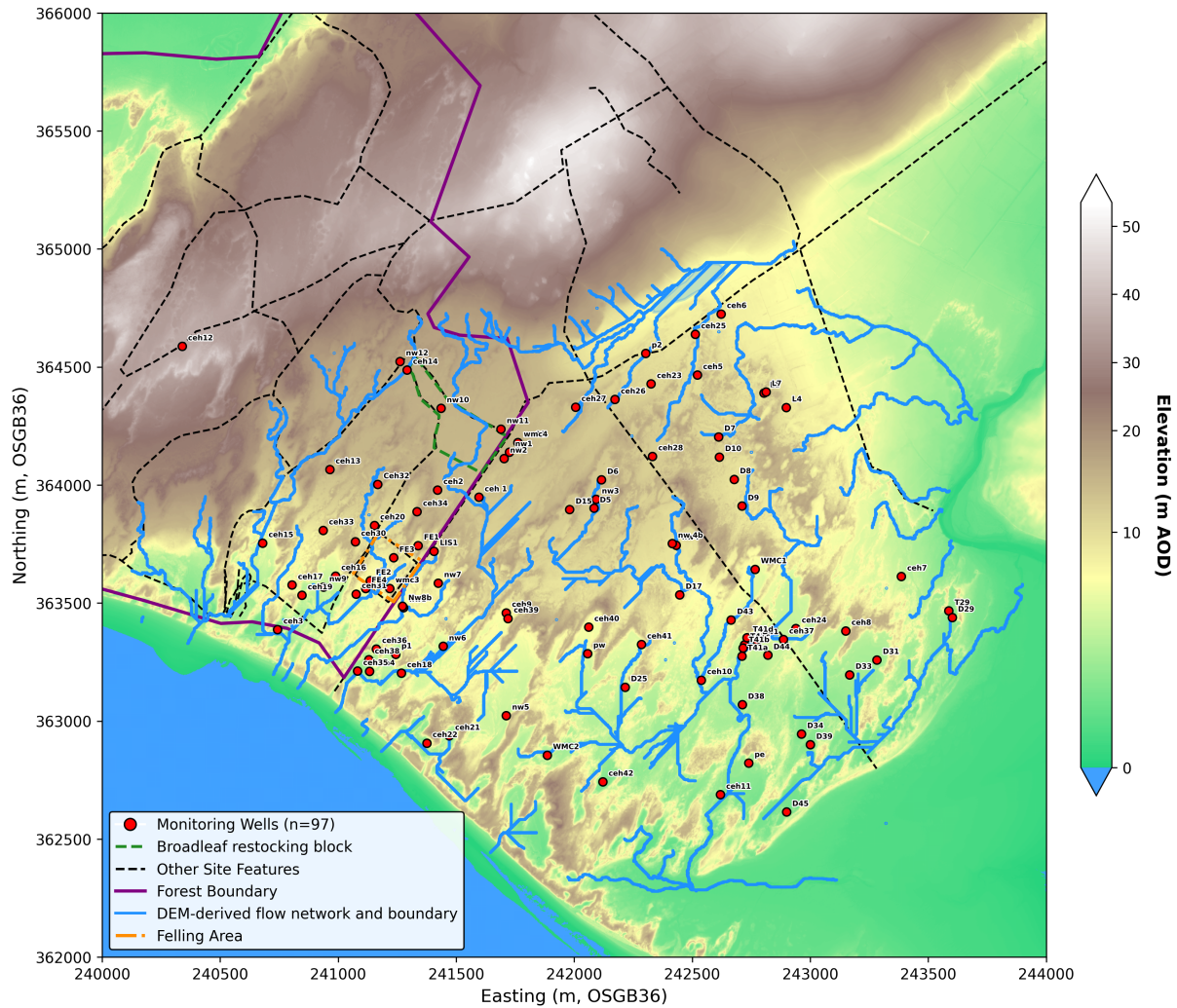
Newborough Warren leży na południowym krańcu wyspy Anglesey i obejmuje około 1300 hektarów wydmy, terenów podmokłych i plantacji drzew iglastych. Teren ten jest Specjalnym Obszarem Ochrony (SOO) — jednym z najważniejszych nadmorskich systemów wydmych w Walii.

Teren jest siedliskiem rzadkich zbiorowisk roślinnych zwanych *zagłębieniami wydmyowymi* (ang. *dune slacks*): nisko położonych niecek między wydrami, gdzie wody gruntowe wznoszą się blisko powierzchni każdej zimy, tworząc sezonowo zalewane mokradła. Rosną tam wierzba płożąca, storczyki i bogata fauna bezkręgowców.

Przetrwanie tych siedlisk zależy całkowicie od wód gruntowych. Jeśli zwierciadło wody w lecie jest zbyt nisko, zbiorowiska roślinne charakterystyczne dla zagłębień wydmych nieodwracalnie przekształcają się w suchsze murawy trawiaste. Różnica między zdrowym mokrym zagłębieniem a zdegradowanym suchym jest zaskakująco mała — zaledwie **37 centymetrów** głębokości zwierciadła wody w lecie.

Znaczna część północnych wydmy została obsadzona sosną korsykańską w latach 1948–1965. Plantacja ta przechwytuje około jedną czwartą opadów, zanim dotrą one do gruntu, zmniejszając ilość wody zasilającej warstwę wodonośną.

Figure 1: Site Topography and Hydrogeological Features



Rycina 1. Przegląd terenu: topografia Newborough Warren, sieć monitoringowa 97 studni, granica lasu (magenta), obszar wycinki 2017 (pomarańczowy) oraz sieć odpływu wyprowadzona z cyfrowego modelu terenu.

Badanie

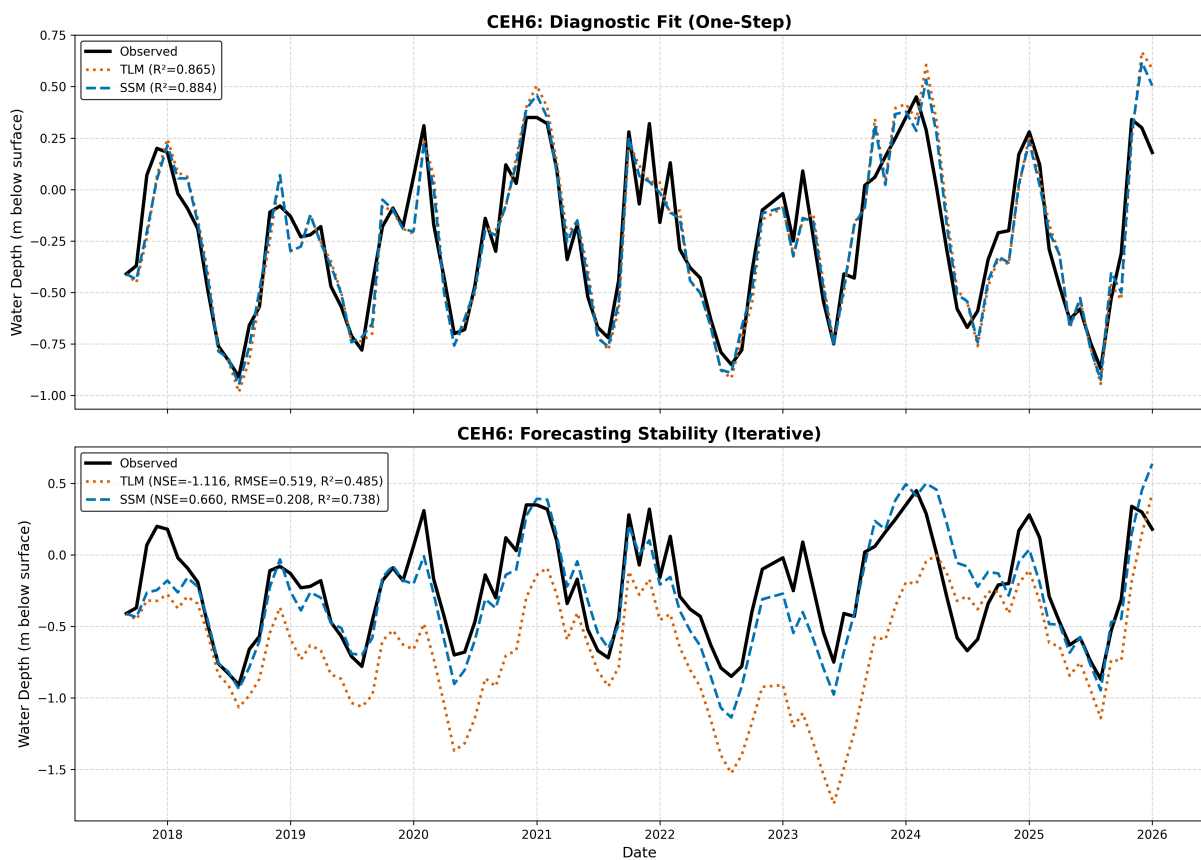
Przez 21 lat (2005–2026) monitorowałem 89 studni na całym terenie, mierząc poziom wody co miesiąc za pomocą prostych ręcznych przyrządów zwanych dipwellami. W połączeniu z ogólnodostępnymi danymi o opadach i temperaturze z pobliskiej stacji meteorologicznej, sieć tę przeanalizowano za pomocą 26-etapowego potoku danych, aby zrozumieć, jak działa system wód gruntowych, jak się zmienia i co może realistycznie osiągnąć gospodarka terenowa.

Metoda została celowo zaprojektowana jako niskokosztowa i odtwarzalna — bez specjalistycznego sprzętu, telemetrii czy analiz laboratoryjnych — tak aby można ją było powielić na innych nadmorskich terenach wydmowych borykających się z podobnymi wyzwaniami.

Jak działa model

Sercem analizy jest proste równanie bilansu wodnego dopasowane niezależnie do każdej studni. Każdego miesiąca zmiana poziomu wody jest wyjaśniana przez trzy konkurujące siły: **opady** podnoszące zwierciadło wody, **parowanie** obniżające je oraz **drenaż** odprowadzający wodę bocznie w kierunku wybrzeża lub jeziora. Model szacuje siłę każdego z tych procesów dla każdej studni, dając trzy współczynniki, które razem definiują zachowanie danej części warstwy wodonośnej. Studnie o podobnych współczynnikach są grupowane w strefy.

Ten model przestrzeni stanów (SSM) porównano z prostszym podejściem funkcji transferowej, które nie ma członu drenażu ze sprzężeniem zwrotnym. Rycina 2 pokazuje oba modele na tle obserwowanych poziomów wody w CEH6. Przy prognozowaniu do przodu SSM utrzymuje realistyczne cykle sezonowe (NSE = 0,66), podczas gdy funkcja transferowa odbiega od rzeczywistości (NSE = -1,1). Człon drenażu zapobiega dryfowaniu modelu.



Rycina 2. Benchmarking modelu w CEH6 (strefa Wydmy). Góra: dopasowanie diagnostyczne jednoetapowe. Dół: prognozowanie iteracyjne — SSM (niebieski) utrzymuje realistyczną amplitudę, funkcja transferowa (pomarańczowy) stopniowo odbiega.

Sezonowe równania prognostyczne

Obok miesięcznego SSM dopasowano parę sezonowych równań prognostycznych dla każdej strefy. **Równanie zimowe** przewiduje szczytowy zimowy poziom wody na podstawie skumulowanych opadów zimowych (październik–marzec) i poprzedniego minimum letniego. **Równanie letnie** przewiduje minimum letnie na podstawie skumulowanych opadów letnich (kwiecień–wrzesień) i poprzedniego szczytu zimowego. Razem oddają pamięć warstwy wodonośnej.

Krytyczne progi opadowe

Ponieważ równanie jest fizycznym bilansem masy, można je uruchomić do przodu: mając zmierzony letni poziom wody i prognozę zimowych opadów, model oblicza, czy zwierciadło wody podniesie się wystarczająco, aby zalać dane zagłębienie. Daje to **krytyczny próg opadowy** dla każdej studni — ilość zimowego deszczu potrzebną do zalania, wyrażoną jako wielokrotność (λ) średniej wieloletniej. Studnie, gdzie λ przekracza 2,0 — wymagające dwukrotności średnich opadów zimowych — są klasyfikowane jako strukturalnie nieosiągalne w ramach jakiegokolwiek zimy z 95-letniego zapisu.

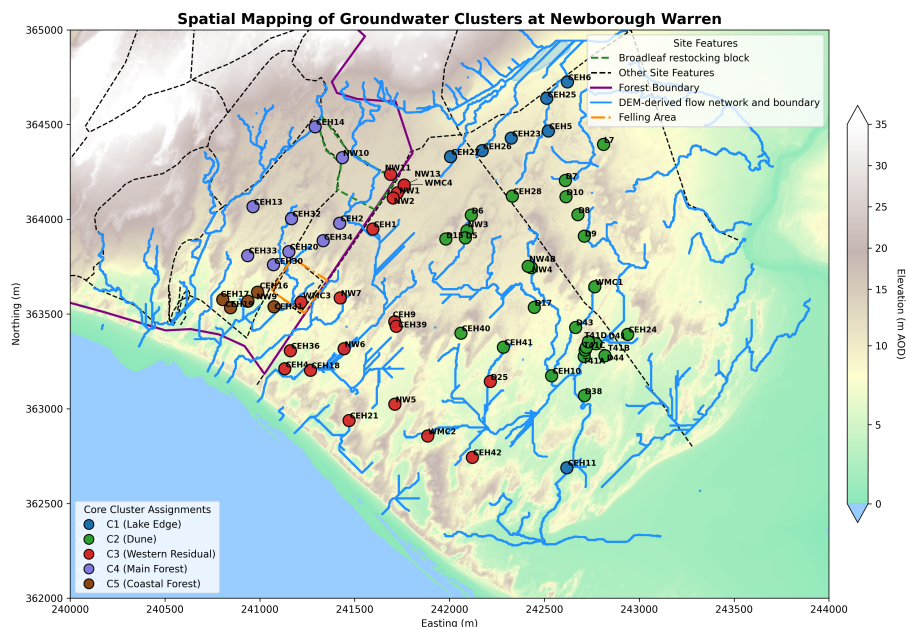
Równania te są wbudowane w interaktywne narzędzie webowe (*przeglądarkę scenariuszy*), które pozwala zarządcom terenu badać, jak różne działania — wycinka drzew, przerzedzanie, konwersja na liściaste, zdejmowanie warstwy wydm — oraz przyszłe scenariusze klimatyczne zmieniłyby poziomy wody na całym terenie. Towarzyszący *prognostyk powodziowy* przelicza pojedynczy odczyt z dipwella na prawdopodobieństwo zimowego zalania, aktualizowane w miarę postępu sezonu.

Pięć odrębnych stref wód gruntowych

Analiza zidentyfikowała pięć odrębnych stref na terenie, z których każda zachowuje się inaczej w zależności od geologii, położenia i pokrycia terenu:

- **C1 — Brzeg jeziora (blok wschodni):** Płytkie zwierciadło wody, szybka reakcja na opady, szybki drenaż. Najbliżej ekologicznego punktu krytycznego.
- **C2 — Wydmy (blok wschodni):** Klasyczne otwarte wydmy dojrzałe, umiarkowana reakcja na opady.
- **C3 — Blok zachodni:** Działa jako głęboki bufor — wolniejsza reakcja, dłużej utrzymuje wodę.
- **C4 — Las główny:** Plantacja sosnowa na cienkiej warstwie gleby nad skałą macierzystą. Drzewa przechwytyują deszcz, a płytkie podłoże nasila letnie przesuszanie.
- **C5 — Las nadmorski:** Plantacja sosnowa na głębszym piasku nadmorskim. Wykazuje najszybszy spadek zwierciadła wody ze wszystkich stref — niemal czterokrotnie szybszy niż następna najgorsza.

Kluczowym odkryciem jest to, że to grubość piasku pod każdym obszarem — a nie drzewa nad nim — decyduje o tym, jak silnie parowanie obniża zwierciadło wody w lecie. W strefie leśnej sama wysokość terenu wyjaśnia 95% zmienności tego efektu przesuszania.



Rycina 3. Mapa przestrzenna pięciu klastrów wód gruntowych. C1 Brzeg jeziora (niebieski), C2 Wydmy (zielony), C3 Blok zachodni (czerwony), C4 Las główny (fioletowy), C5 Las nadmorski (brązowy).

Porównanie pięciu stref

Poniższa tabela podsumowuje kluczowe cechy każdej strefy wód gruntowych. „Wrażliwość zasilania” mierzy, jak silnie opady podnoszą zwierciadło wody; „ciąg parowania” mierzy, jak silnie letnie ciepło je obniża; „tempo drenażu” określa, jak szybko woda odpływa; a „udział korony” to ile energii opadów pochłania parowanie z korony drzew i gleby. Trzy współczynniki są bezwymiarowymi parametrami modelu — większe wartości oznaczają silniejszy efekt.

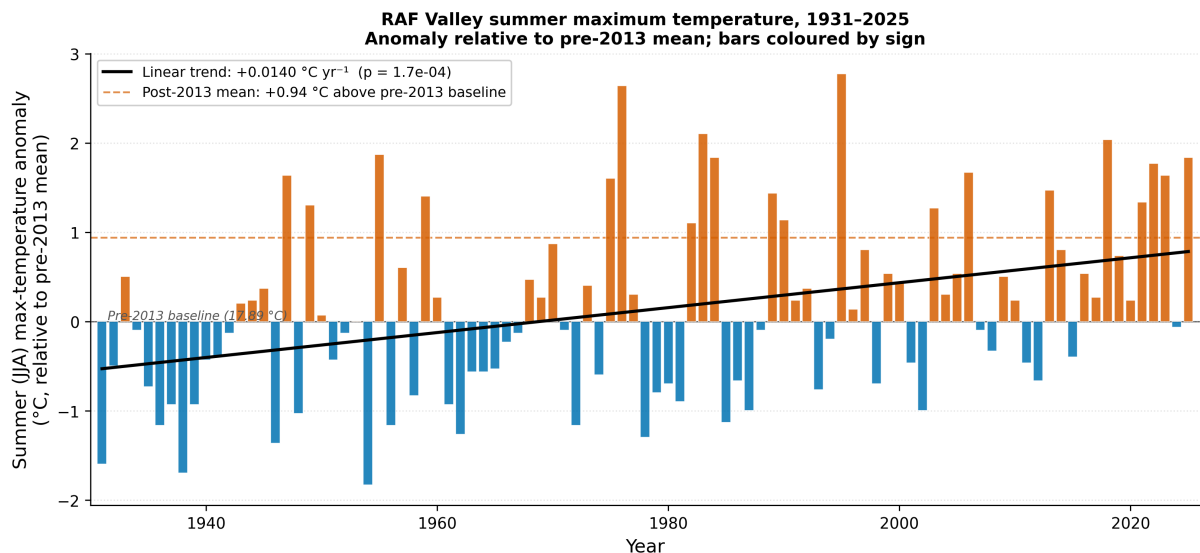
Strefa	Charakterystyka	Wrażliwość zasilania (bezwym.)	Ciąg parowania (bezwym.)	Tempo drenażu (miesiąc ⁻¹)	Udział korony (%)
C1 Brzeg jeziora	Płytki, szybki drenaż, blisko progów	4,58 (najwyższy)	0,96 (najniższy)	0,090 (najszybszy)	22%
C2 Wydmy	Otwarte wydmy dojrzałe, umiarkowana reakcja	3,87	1,74	0,063	26%
C3 Zachodni	Głęboki bufor, wolna reakcja	3,58	1,81	0,060	28%
C4 Las główny	Sosny na cienkim podłożu nad skałą	2,52 (najniższy)	2,50 (najwyższy)	0,021 (najwolniejszy)	40%
C5 Las nadmorski	Sosny na głębszym piasku; najszybszy spadek	2,44	1,37	0,045	41%

Tabela 1. Podsumowanie pięciu stref wód gruntowych. Wyższa wrażliwość zasilania oznacza silniejszą reakcję zwierciadła wody na opady. Wyższy ciąg parowania oznacza silniejsze letnie przesuszanie. Większy udział korony oznacza więcej opadów przechwyconych przez drzewa.

Główne odkrycie: liczy się lato

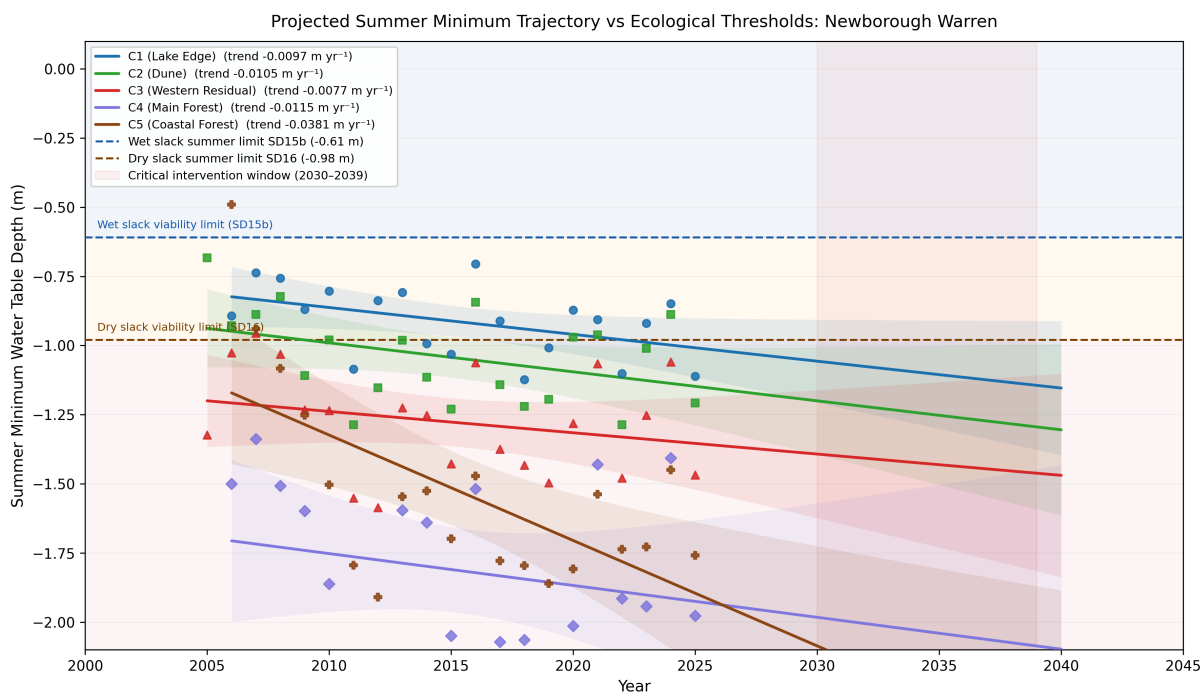
Tradycyjnie uważa się, że to zimowe opady wypełniają zagłębienia wydymowe. Niniejsze badanie wykazało coś odwrotnego: to *letnie minimum* poziomu wody decyduje, czy zagłębienie zaleje się następnej zimy. Jeśli zwierciadło wody obniży się zbyt mocno w lecie, żadna realistyczna ilość zimowego deszczu nie uzupełni deficytu.

Ma to znaczenie, ponieważ lata stają się coraz cieplejsze. Od 2013 roku średnie letnie temperatury w okolicy są o prawie 1°C wyższe od średniej wieloletniej, co zwiększa parowanie i pogłębia letnią suszę.



Rycina 4. Anomalia temperatury letniej na stacji RAF Valley (najbliższa stacja meteorologiczna), 1931–2025. Słupki pomarańczowe = lata cieplejsze od średniej sprzed 2013; słupki niebieskie = lata chłodniejsze. Przerwana pomarańczowa linia = średnia po 2013: +0,94°C powyżej linii bazowej.

Zwierciadło wody obniża się we wszystkich pięciu strefach, a trend jest najsilniejszy w strefach Brzegu jeziora i Lasu nadmorskiego. Przy obecnym tempie spadku, strefa Brzegu jeziora — gdzie znajduje się wiele najcenniejszych ekologicznie zagłębień — prawdopodobnie przekroczy próg utrzymania siedliska wydumowego około roku **2030–2032**.



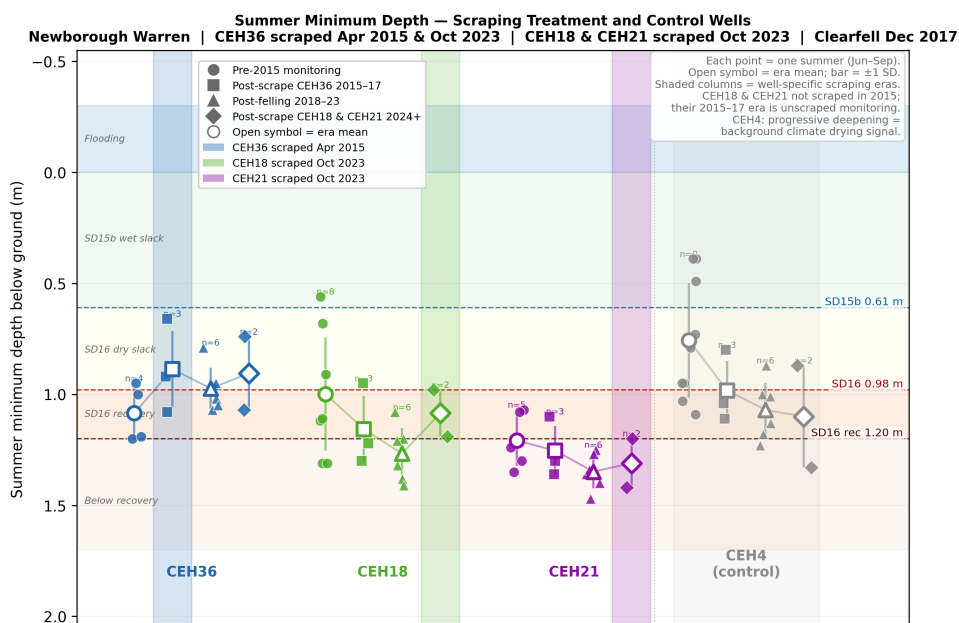
Rycina 5. Prognozowane trajektorie letniego minimum poziomu wody dla pięciu klastrow. Niebieska linia przerywana = próg mokrego zagłębienia (-0,61 m); brązowa linia przerywana = próg suchego zagłębienia (-0,98 m). Żółty pas = krytyczne okno interwencji (2030–2039).

Jakie działania zarządcze podjęto

Zdejmowanie wierzchniej warstwy wydym

Zdejmowanie wierzchniej warstwy wydym (ang. *dune scraping*) polega na mechanicznym usunięciu górnej warstwy piasku, aby przybliżyć powierzchnię terenu do zwierciadła wody. W jednej studni (CEH36) trzy niezależne metody zbiegały się na korzyści z zabiegu rzędu 80–140 mm, z parową zmianą letniego minimum o +195 mm — ponad połowę krytycznego gradientu ekologicznego 37 cm. Korzyść jest geometryczna (trwałe obniżenie powierzchni terenu), zachowując około 68% głębokości zabiegu jako długoterminową poprawę.

Jednakże zabieg działa tylko wtedy, gdy jest odpowiednio umiejscowiony w krajobrazie. W bardziej nadmorskich lokalizacjach (CEH18 i CEH21) korzyść została zdominowana przez odrębny problem: samo wybrzeże cofa się, co obniża zwierciadło wody od strony morza w głąb lądu.



Rycina 6. Letnie minimum głębokości w trzech studniach poddanych zabiegowi i studni kontrolnej (CEH4). CEH36 (niebieski) wykazuje wyraźny wzrost po zabiegu w 2015 r. CEH18 i CEH21 (zielony i fioletowy), zabieg w 2023 r. — ograniczona reakcja. CEH4 (szary) = trend klimatycznego przesuszenia.

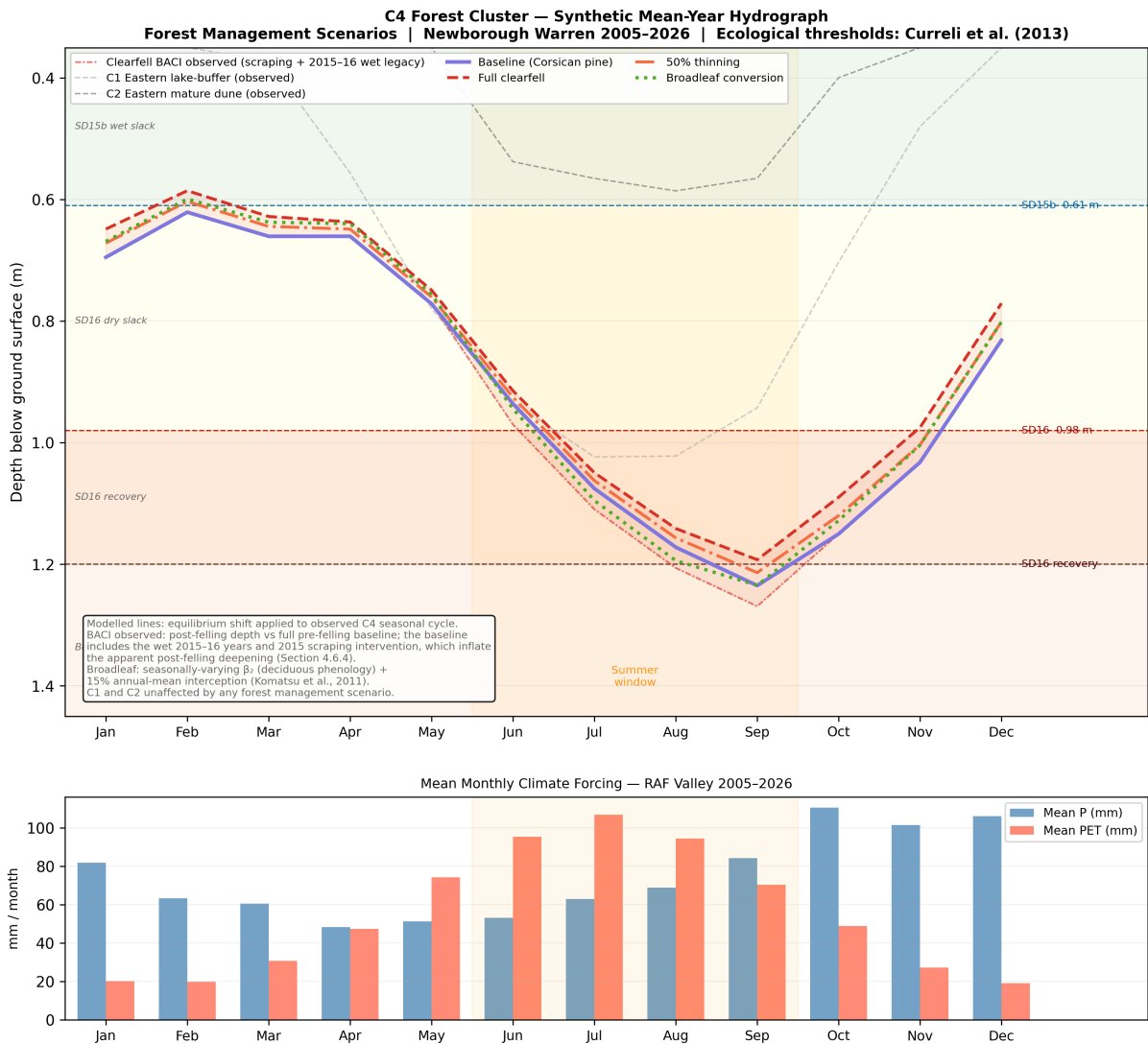
Badanie zaleca kierowanie zabiegów na śródlądowe stanowiska przejściowe w strefach C1, C2 i C3, gdzie podstawa warstwy wodonośnej jest stabilna, a progi opadowe dla zimowego zalewania są wciąż osiągalne.

Wycinka drzew

W grudniu 2017 roku wycięto około 8 hektarów sosny korsykańskiej jako eksperyment zarządczy. W badaniu zastosowano rygorystyczny pięciopoziomowy schemat doświadczalny z 17 studniami i trzema niezależnymi grupami kontrolnymi, aby sprawdzić, czy usunięcie drzew podnosi zwierciadło wody.

Wynik był złożony. Porównując studnie wycięte ze studniami w nienaruszonym lesie — najbardziej bezpośredni test — analiza wykazała **statystycznie istotny wzrost średnich miesięcznych poziomów wody** o około +93 mm w studni głównej i +153 mm na skraju lasu. Jednakże **letnie minima głębokości — wskaźnik decydujący o przetrwaniu zagłębień wydmowych — nie wykazały odpowiedniej poprawy**. Wycinka podniosła średnie poziomy wody, ale nie mogła pokonać równoczesnego spadku efektywności zasilania w miesiącach letnich, kiedy ma to największe znaczenie.

Analiza sugeruje, że korona leśna działa zarówno jako *pochłaniacz* (przechwytuje deszcz), jak i jako *bufor* (chroni grunt przed bezpośrednim parowaniem w lecie). Usunięcie korony odzyskuje część zimowego zasilania, ale jednocześnie naraża glebę na silniejsze letnie przesuszanie — oba efekty mniej więcej się znoszą.



Rycina 7. Sezonowy cykl zwierciadła wody w strefie Lasu głównego (C4). Linia bazowa (niebieska) obok scenariuszy: pełna wycinka (czerwona przerywana), przerzedzenie 50% (pomarańczowa), konwersja na liściaste (zielona kropkowana). Pasma progów ekologicznych i sezonowy bilans opadów/parowania poniżej.

Co istotne, zmiany w lesie nie rozprzestrzeniają się na otwarte zagłębienia wydmowe, gdzie potrzeby ekologiczne są największe. Las i otwarte wydmy funkcjonują jako w dużej mierze niezależne systemy wód gruntowych.

Spadek efektywności zasilania

Być może najbardziej niepokojącym odkryciem jest ogólnoterenowy spadek *efektywności zasilania* — czyli udziału opadów, który faktycznie dociera do zwierciadła wody. Spadek ten jest najsilniejszym kandydatem na mechanizm odpowiedzialny za obserwowane pogarszanie się letnich minimów w całej sieci monitoringowej. Dotyka wszystkich pięciu stref w równym stopniu, niezależnie od tego, czy są zalesione czy otwarte, poddane zabiegom czy nie, i działa niezależnie od pokrywy leśnej. Jest to spójne ze zmieniającymi się wzorcami opadów (mniej długotrwałych, równomiernych deszczów; więcej krótkich, intensywnych burz, z których woda spływa zamiast wsiąkać) i stanowi trend napędzany zmianami klimatu, któremu żadne działania terenowe nie mogą zaradzić.

Erozja wybrzeża: ukryte i opóźnione zagrożenie

Linia brzegowa Newborough cofa się. Gdy plaża ulega erozji, warstwa wodonośna traci objętość od strony morza, a zwierciadło wody obniża się. Ponieważ wody gruntowe przepływają przez piasek powoli, skutki erozji przybrzeżnej potrzebują lat, by dotrzeć w głąb lądu — co oznacza, że spadek widoczny w dzisiejszych danych monitoringowych odzwierciedla erozję sprzed lat. Jeśli erozja przyspiesza, najgorsze skutki jeszcze nie dotarły do wewnętrznych studni.

Dwie studnie kontrolne w różnych odległościach od wybrzeża obie pogarszają się w sposób spójny z postępującym cofaniem się brzegu, niezależnie od jakichkolwiek działań zarządczych. Zagłębienia przybrzegowe mogą ostatecznie wymagać kontrolowanego wycofania, a nie wielokrotnej odbudowy topograficznej.

Co to oznacza na przyszłość

Wnioski z badania są poważne, ale jasne:

1. **Okno na skuteczną interwencję jest ograniczone** — szacowane na około jedną do dwóch dekad w najbardziej zagrożonych miejscach.
2. **Ukierunkowane zdejmowanie warstwy wydm na starannie wybranych stanowiskach śródlądowych** jest najskuteczniejszą dostępną interwencją bezpośrednią, ale jej korzyści są z czasem niwelowane przez ogólny trend klimatyczny.
3. **Wycinka drzew na dużą skalę prawdopodobnie nie podniesie znacząco poziomu wód** na otwartych wydmach, gdzie siedliska są najbardziej zagrożone. Dowody przemawiają za utrzymaniem pokrywy leśnej przy jednoczesnym regulowaniu gęstości korony, aby częściowo odzyskać przechwycone opady bez utraty ochrony buforowej w lecie.
4. **Zmiana klimatu jest ograniczeniem wiążącym.** Rosnące temperatury letnie, spadająca efektywność zasilania i erozja wybrzeża działają w tym samym kierunku i żadne z nich nie może być rozwiązane wyłącznie przez gospodarkę siedliskową na miejscu.
5. **Ciągły monitoring jest niezbędny.** Narzędzia prognostyczne opracowane w tym badaniu — w tym równania krytycznych progów opadowych i interaktywny system prognozowania — dają zarządcom terenu możliwość śledzenia, czy warunki zmierzają ku przekroczeniu progów ekologicznych, i priorytetyzowania interwencji tam, gdzie mogą jeszcze zrobić różnicę.