

## Silny wiatr oraz trąba powietrza i burze w dniach 21-23 grudnia 2023 roku

### Opracowanie przygotowali:

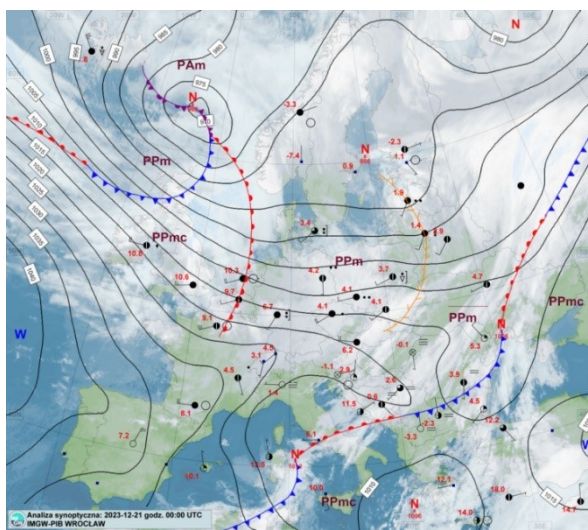
Kierownik zespołu: dr Grzegorz Duniec  
dr Natalia Pilgaj  
mgr Mateusz Zamajtys  
mgr Gabriel Stachura  
mgr inż. Piotr Szuster  
mgr Robert Pyrc

### 1. Opis sytuacji synoptycznej

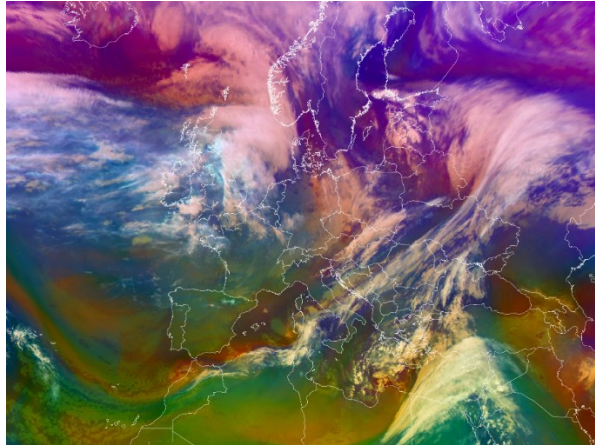
**21.12.2023**

Przeważający obszar Europy znajdował się w zasięgu obszaru obniżonego ciśnienia z dość licznie występującymi płytkimi ośrodkami niżowymi. Główny ośrodek, w którym ciśnienie atmosferyczne obniżyło się do około 975 hPa znajdował się w rejonie Morza Norweskiego. Towarzyszył mu dobrze rozbudowany układ frontów atmosferycznych obejmujący swoim wpływem Wyspy Brytyjskie, Irlandię, Morze Północne oraz zachodnią część Skandynawii. Inna wyraźnie zaznaczona strefa frontowa przebiegała nad wschodnią Europą. Obszar podwyższonego ciśnienia ograniczył się do Półwyspu Iberyjskiego, części Francji oraz Alp, a jego centrum z ciśnieniem atmosferycznym na poziomie nieco ponad 1040 hPa znajdowało się nad wschodnim Atlantykiem. Między głównymi ośrodkami barycznymi zauważalny był znacznie zaostrzony, poziomy gradient ciśnienia atmosferycznego, co w jego zasięgu skutkowało występowaniem silnego i porywistego wiatru.

Rozkład izobar zbliżony do równoleżnikowego, determinował szeroki strumień napływu mas powietrza polarnego morskiego znad Atlantyku w głąb Europy. Chłodniejsze powietrze pochodzenia arktycznego zalegało jedynie na północy Skandynawii i w rejonie Morza Barentsa. W ciepłym wycinku głównego ośrodka niżowego identyfikowano cieplejsze powietrze polarne morskie; obecnie było ono także na krańcach południowo-wschodnich Europy (rys. 1 i 2).

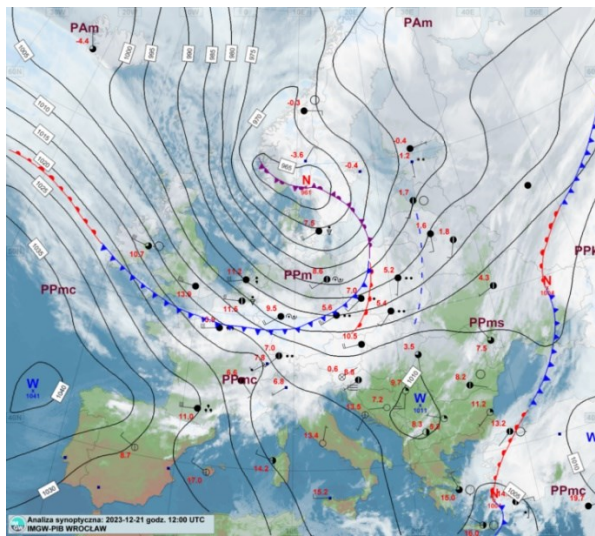


Rys. 1. Mapa synoptyczna Europy z dn. 21.12.2023 z godz. 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>).



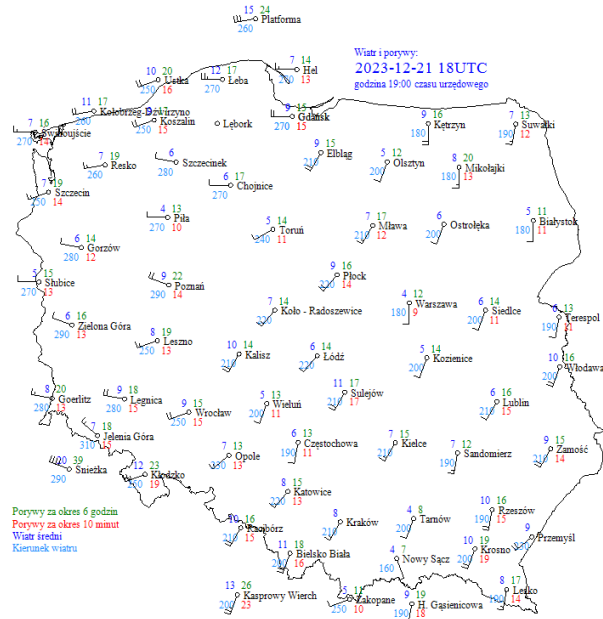
Rys. 2. Obraz satelitarny – produkt Airmass – z dn. 21.12.2023 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>) – rozkład stref zachmurzenia i mas powietrza nad Europą; m.in. widoczny system zachmurzenia frontowego niżu znad Morza Norweskiego i obecne w jego wycinku wyraźnie cieplejsze i wilgotniejsze powietrze polarne morskie.

W ciągu dnia główny ośrodek niżowy dynamicznie przemieszczał się w kierunku Cieśnin Duńskich i południowej Szwecji, jednocześnie pogłębiając się i uzyskując w ośrodku ciśnienie atmosferyczne na poziomie około 960 hPa. Związany z nim system frontów atmosferycznych, podobnie jak niż, szybko przemieszczał się na południowy wschód, sukcesywnie się okładując. Bez istotnych zmian pozostało położenie, jak i wysokość ciśnienia atmosferycznego wyżej nad Atlantykiem. Strefa zaostzonego gradientu poziomego ciśnienia atmosferycznego znad Wielkiej Brytanii i Morza Północnego stopniowo przesuwiała się w kierunku Polski (rys. 3).

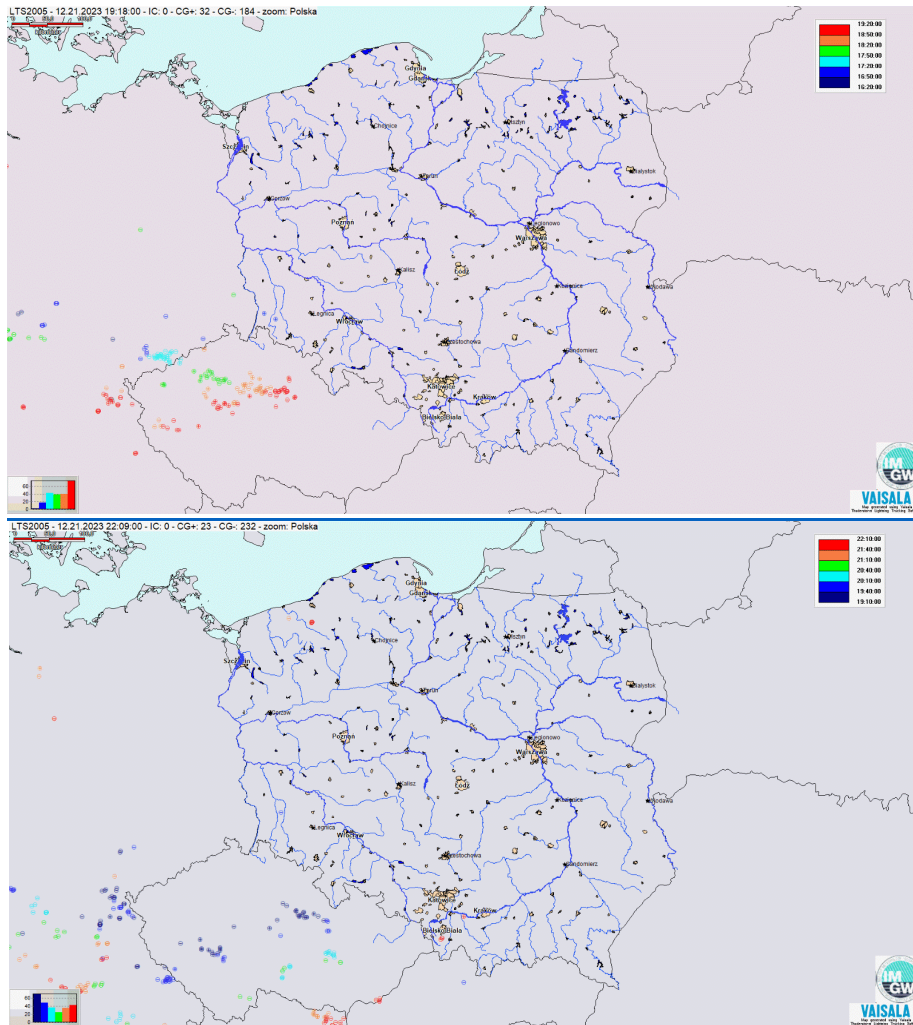


Rys. 3. Mapa synoptyczna Europy z dn. 21.12.2023 z godz. 12 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>).

Do końca dnia na terenie Polski miejscami pojawiły się porywy wiatru do 80 km/h (stacje meteorologiczne w Kłodzku, Poznaniu, Ustce, Mikołajkach, Krośnie i Lesznie) (rys. 4). Wieczorem lokalnie na Pomorzu Zachodnim i Górnym Śląsku pojawiły się pojedyncze wyładowania atmosferyczne związane z dynamicznym wyparciem cieplejszej polarnej morskiej masy powietrza, przez chłodniejsze powietrze atlantyckie z wyższych szerokości geograficznych (rys. 5).



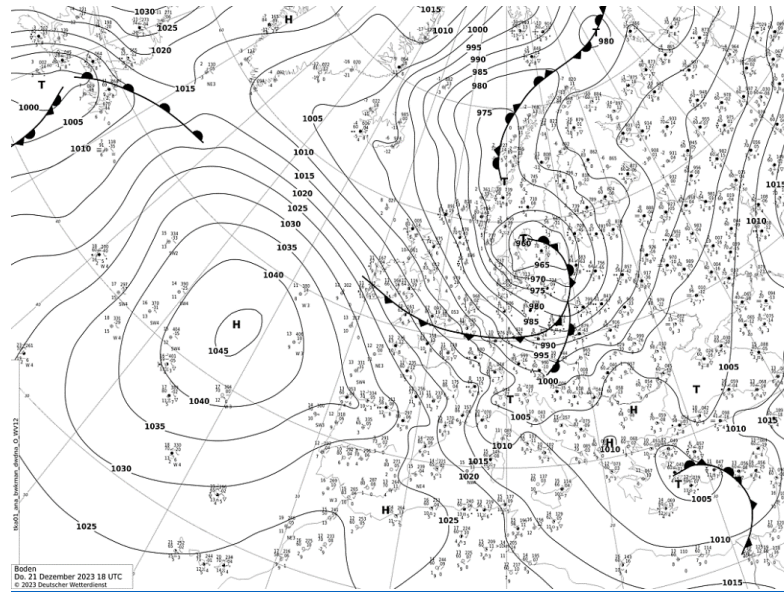
Rys. 4. Mapa synoptyczna Polski z dn. 21.12.2023 z godz. 18 UTC (dane operacyjne IMGW-PIB).



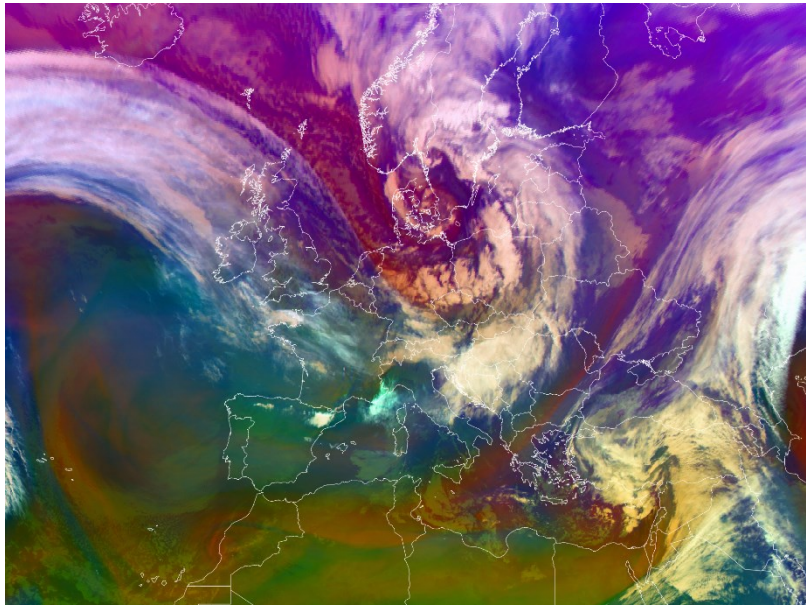
Rys. 5. Zarejestrowane wyładowania atmosferyczne nad Polską pod koniec dnia 21.12.2023 (kolejno godz. 19:18 UTC i 22:09 UTC) (dane operacyjne systemu PERUN).



Na uwagę zwraca fakt wystąpienia szczególnie wzmożonej aktywności zjawisk konwekcyjnych, w tym aktywności burzowej, jakie zaznaczyły się wieczorem i początkowo w nocy 21.12.2023 na dynamicznie przemieszczającym się froncie chłodnym w pasie od krajów Beneluxu, przez Niemcy, po Czechy i Austrię (rys. 6, 7 i 8).

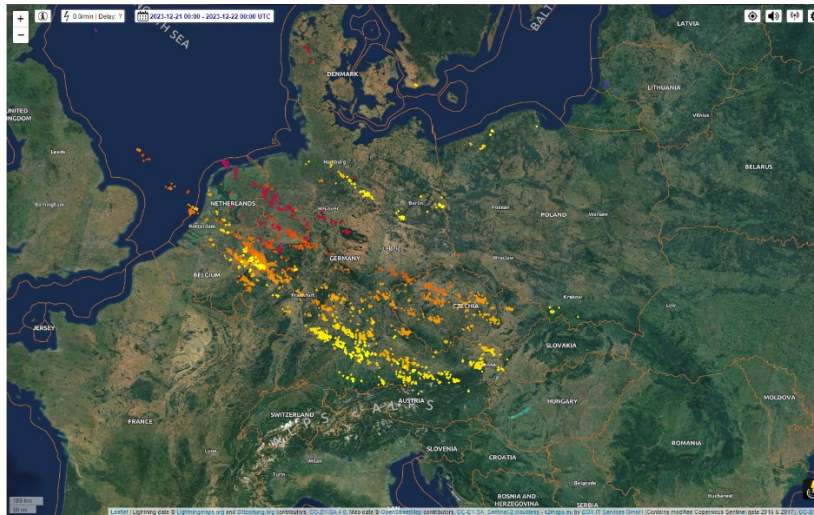


Rys. 6. Mapa synoptyczna Europy z dn. 21.12.2023 z godz. 18 UTC ([https://wetter3.de/archiv\\_dwd\\_dt.html](https://wetter3.de/archiv_dwd_dt.html)).



Rys. 7. Obraz satelitarny – produkt Airmass – z dn. 21.12.2023 z godz. 18 UTC (<https://view.eumetsat.int/>) – widoczny wyraźny wlew chłodniejszej masy powietrza nad Polskę i wyparcie cieplejszego powietrza zalegającego w zasięgu systemu frontowego niżu przemieszczającego się nad południową Szwecją; dobrze widoczny jest również pas zachmurzenia konwekcyjnego powstałego w strefie kontrastu termicznego między masami powietrza.

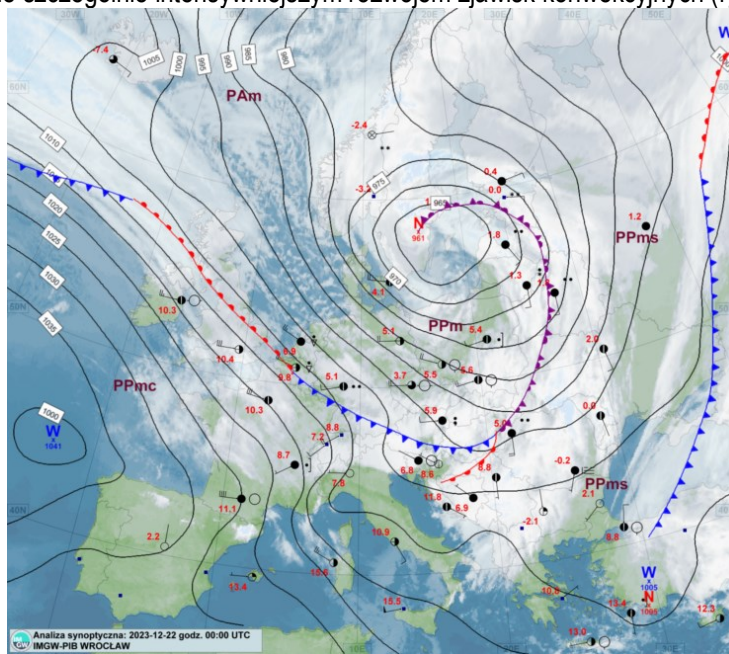




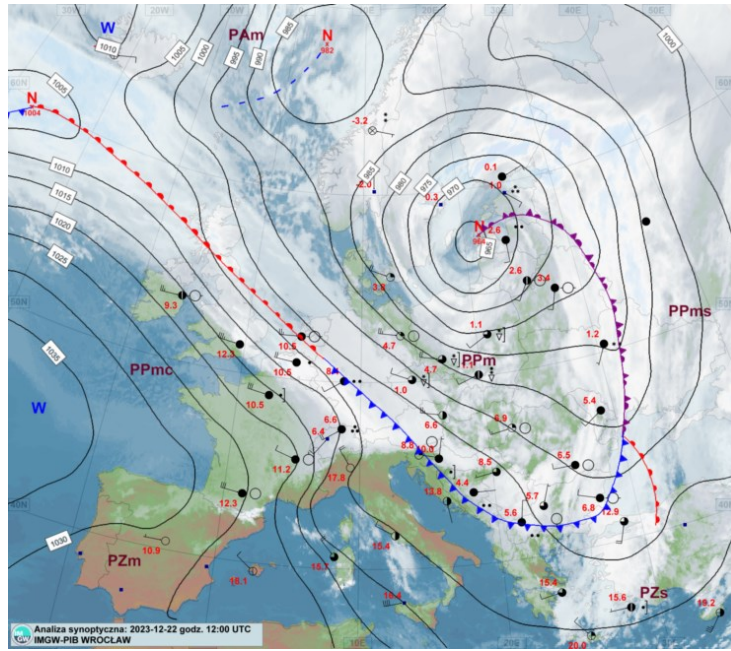
Rys. 8. Zarejestrowane wyładowania atmosferyczne na terenie zachodniej i środkowej Europy do końca dnia 21.12.2023 (<https://www.lightningmaps.org/>).

## 22.12.2023

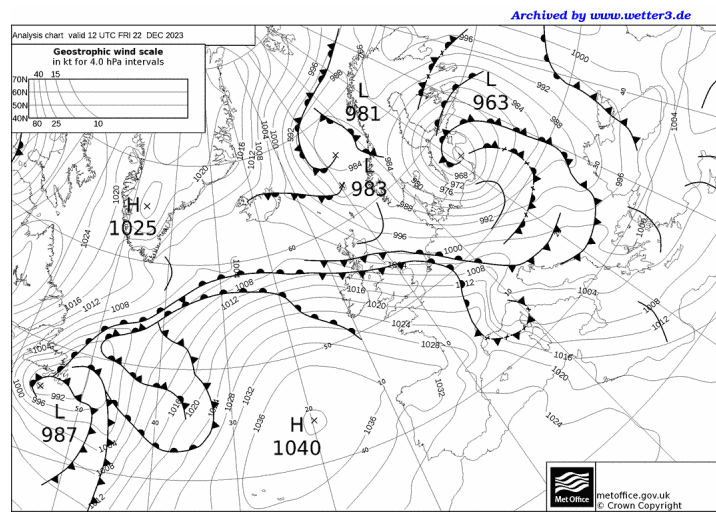
Głęboki ośrodek niskiego ciśnienia z nad południowej Skandynawii kontynuuje wędrówkę w kierunku krajów bałtyckich – w tym przypadku w kierunku Łotwy. Ciśnienie atmosferyczne w niżu nieznacznie wzrosło do około 965 hPa, po czym ustabilizowało się na tym poziomie. Przeciwny ośrodek baryczny, jakim był układ wysokiego ciśnienia nad Atlantykiem nieco osłabł – odnotowano zanik izobary zamykającej wartość 1040 hPa. Poziomy gradient ciśnienia atmosferycznego między ośrodkami barycznymi uległ niewielkiemu zmniejszeniu, niemniej jednak nadal zasługiwał na szczególną uwagę w kwestii prognozowania silnego wiatru. Nad Polskę szerszym strumieniem zaczęła napływać chłodniejsza masa powietrza polarnego morskiego z wyższych szerokości geograficznych. Główny system zachmurzenia frontowego opuścił Polskę, jednak wewnątrz dynamicznie napływającej świeższej masy powietrza atlantyckiego formowały się charakterystyczne fronty drugorzędne wyrażone szczególnie intensywniejszym rozwojem zjawisk konwekcyjnych (rys. 9 - 13).



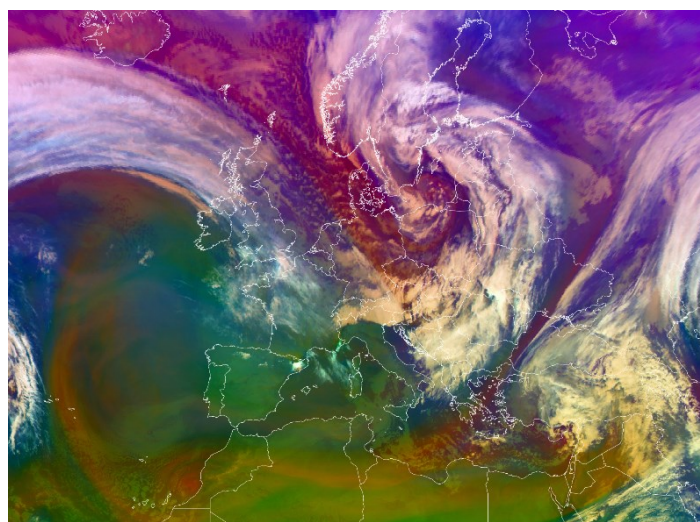
Rys. 9. Mapa synoptyczna Europy z dn. 22.12.2023 z godz. 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>).



Rys. 10. Mapa synoptyczna Europy z dn. 22.12.2023 z godz. 12 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>).

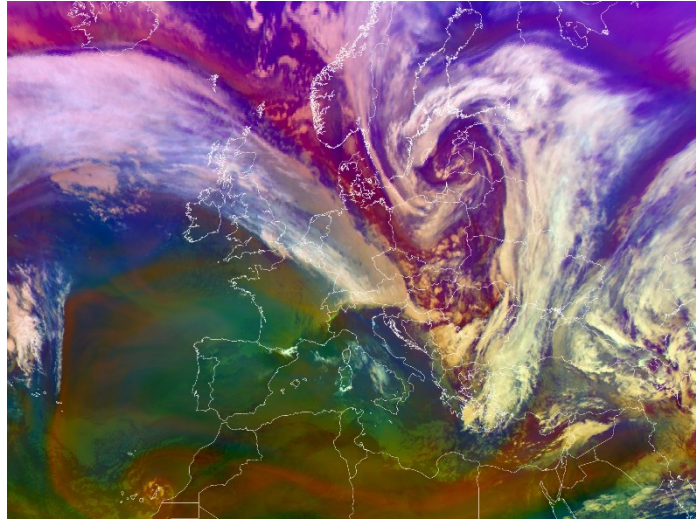


Rys. 11. Mapa synoptyczna Europy z dn. 22.12.2023 z godz. 12 UTC ([wetter3.de/archiv\\_ukmet\\_dt.html](https://wetter3.de/archiv_ukmet_dt.html)).



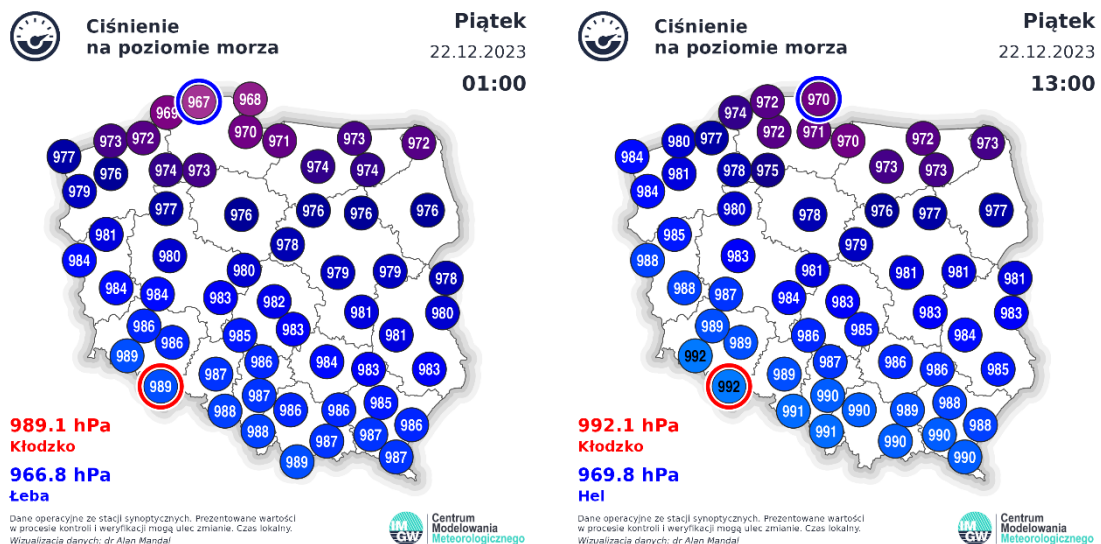
Rys. 12. Obraz satelitarny – produkt Airmass – z dn. 22.12.2023 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>) – niż przemieszcza się nad Bałtykiem, system zachmurzenia frontowego opuszcza Polskę, chłodniejsze powietrze obecne jest na terenie całego kraju.





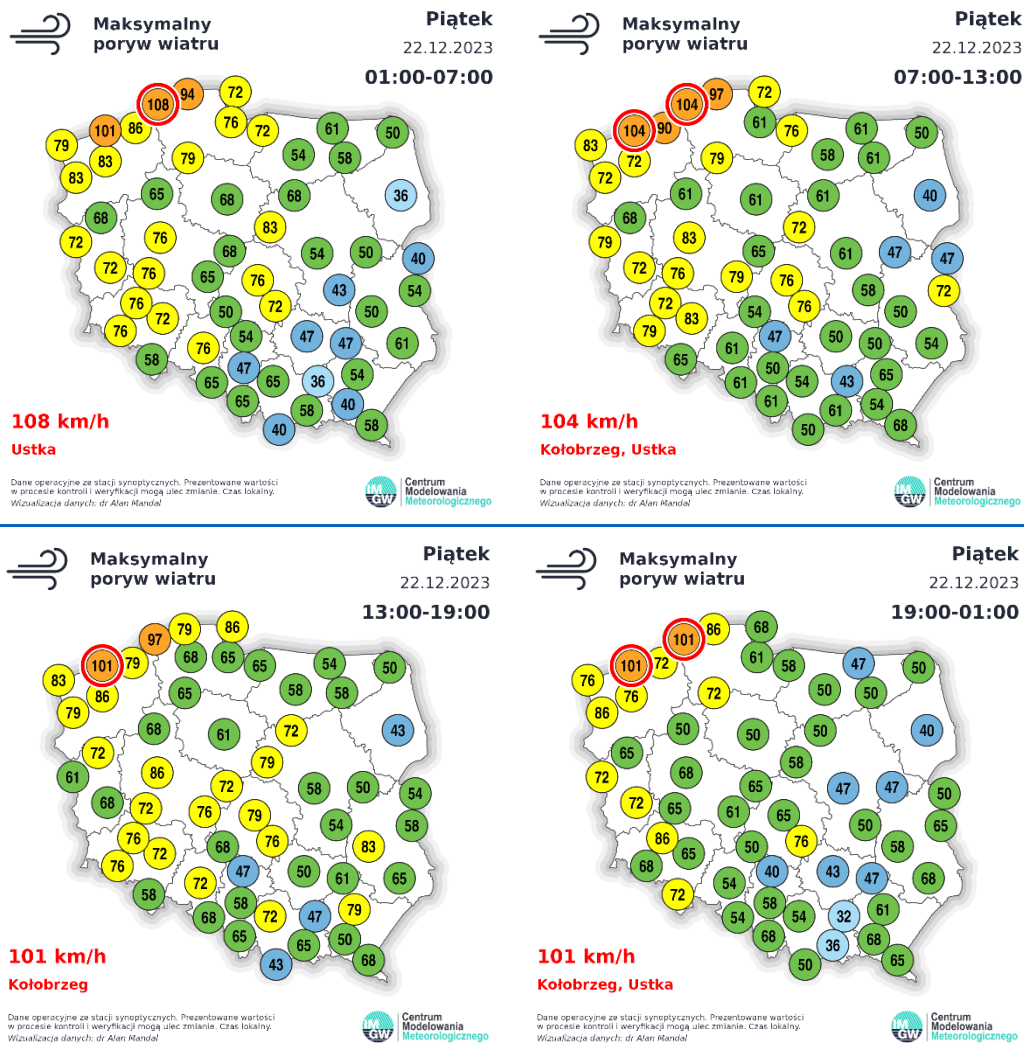
Rys. 13. Obraz satelitarny – produkt Airmass – z dn. 22.12.2023 z godz. 12 UTC (<https://view.eumetsat.int/>) – niż dociera do Łotwy, spowalnia i okluduje się; na terenie Polski rozwija się zachmurzenie konwekcyjne wewnątrz napływającej chłodnej masy powietrza, a w szczególności w obszarze oddziaływania drugorzędного frontu chłodnego, na północy obserwuje się także zachmurzenie związane z frontem okluzji.

W dzień nad Polską zaznaczył się obszar największego zagęszczenia izobar (różnica ciśnienia atmosferycznego między Polską północną, a południową wynosiła 20-23 hPa), prowadząc do nasilenia się wiatru osiągającego w porywach prędkość 70-90 km/h, a nad morzem 100-110 km/h (rys. 14 i 15).



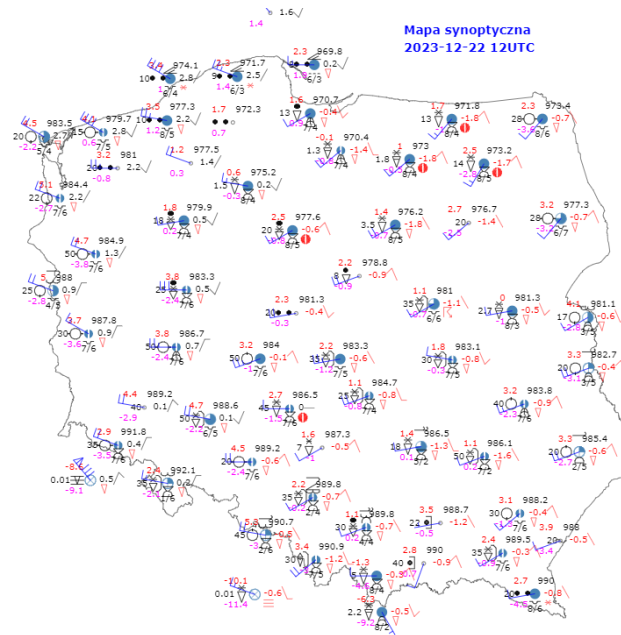
Rys. 14. Ciśnienie atmosferyczne na stacjach meteorologicznych w Polsce – godz. 00 UTC i 12 UTC (dane operacyjne CMM IMGW-PIB).



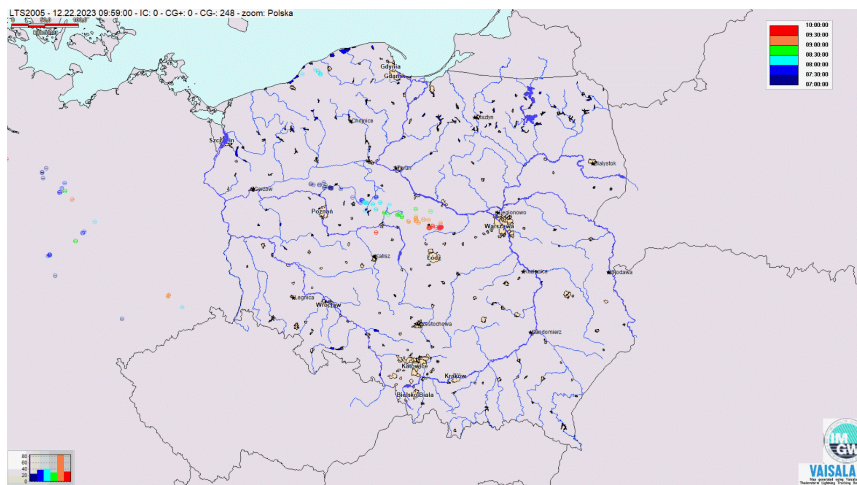


Rys. 15. Maksymalne porywy wiatru na stacjach meteorologicznych w Polsce w dn. 22.12.2023 (dane operacyjne CMM IMGW-PIB).

Od godzin nocnych 22.12.2023 w spływającej chłodnej masie powietrza polarnego morskiego licznie rozwijały się zjawiska konwekcyjne, przynoszące przelotne opady deszczu, deszczu ze śniegiem, śniegu czy krupy śnieżnej. Sporej ilości ośrodkom towarzyszyły również wyładowania atmosferyczne. Burze wystąpiły na Pomorzu, w centrum, na południu i wschodzie kraju. Najaktywniejsza formacja burzowa przemieszczała się od Pomorza Zachodniego przez Wielkopolskę, po Mazowsze. Podczas swojej wędrówki przynosiła oprócz opadów mieszanych, wiatr w porywach do 70-85 km/h (Rys. 16 i 17). Szczególnie niebezpieczna okazała się być jednak inna burza przemieszczająca się nieco na południe od wyżej przytoczonej – krótkotrwałe przybrała ona charakter burzy superkomórkowej, prowadząc do rozwoju rotującego prądu wstępującego i wystąpienia trąby powietrznej. Zdarzenie miało to miejsce w Wielkopolsce, na południe od Konina w rejonie Rychwał. Dokładniejsza analiza tego przypadku jest przewidziana w kolejnym rozdziale.

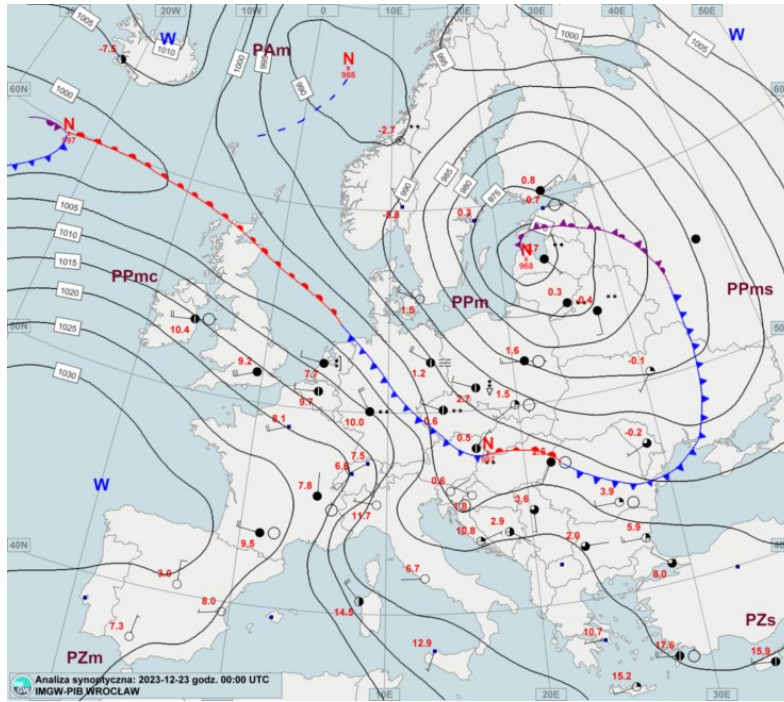


Rys. 16. Mapa synoptyczna Polski z dn. 22.12.2023 z godz. 12 UTC (dane operacyjne IMGW-PIB) – różnorodność występujących opadów i zjawisk.

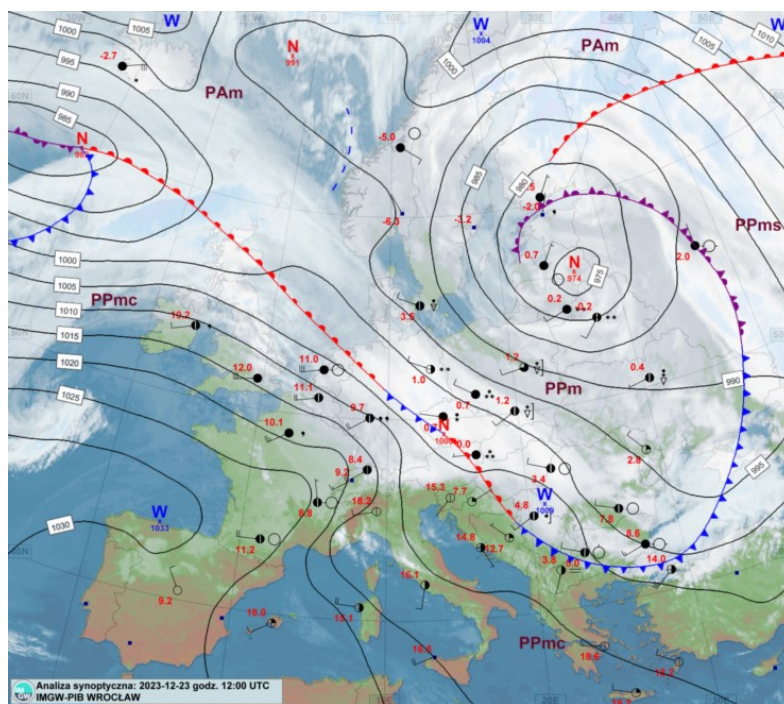


Rys. 17. Zarejestrowane wylądowania atmosferyczne nad Polską dn. 22.12.2023 (godz. 09:59) (dane operacyjne systemu PERUN).

Pod koniec dnia gradient ciśnienia atmosferycznego nad zachodnią i centralną Europą, w tym nad Polską stopniowo zmniejszał się. Głęboki ośrodek niskiego ciśnienia, dalej spowalniając swoją wędrówkę, tylko nieznacznie zmieniając swoje położenie nad Łotwą, stopniowo wypełniał się – na przełomie 22/23.12.2023 roku ciśnienie atmosferyczne w jego ośrodku wzrosło do 970-975 hPa. Układ wysokiego ciśnienia ustabilizował wartość w centrum na poziomie nieco ponad 1030 hPa i dalej nie wykazywał istotnych zmian. Widoczny był jednak rozbudowujący się słaby klin wyżu w kierunku Wysp Brytyjskich i Skandynawii, powodujący stopniowe rozrzedzenie izobar, zwłaszcza w rejonie Morza Północnego, Danii, Niemiec i krajów Beneluksu, a dalej także Polski (rys. 18 i 19).



Rys. 18. Mapa synoptyczna Europy z dn. 23.12.2023 z godz. 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>).



Rys. 19. Mapa synoptyczna Europy z dn. 23.12.2023 z godz. 12 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>).

## 2. Niż *Pia* nad Polską w modelach ALARO i AROME, 21-22.12.2023 roku

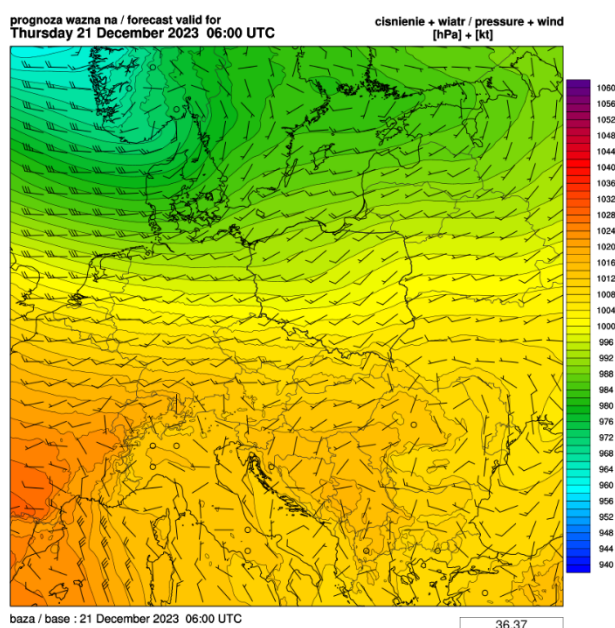
### Wstęp

W tej części opracowania przedstawiono ewolucję prognozowanych przez model ALARO oraz AROME warunków atmosferycznych panujących na obszarze Polski. Prognozy te zostały zainicjowane w czwartek 21 grudnia o godz. 6:00 UTC.

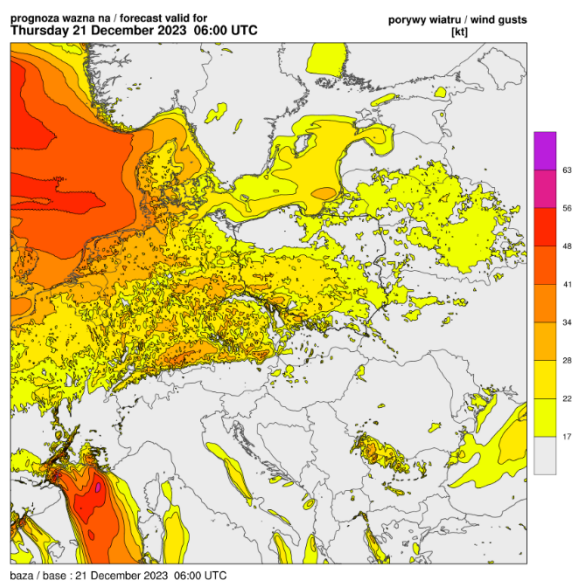


## Symulacje z modelu ALARO

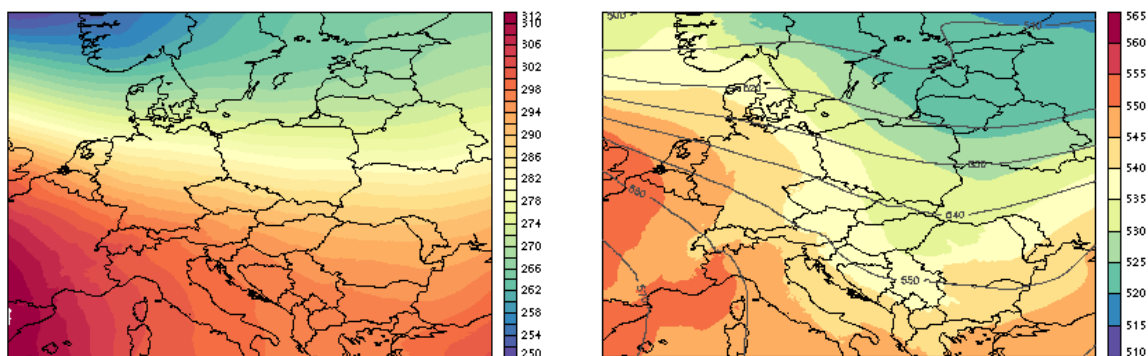
W chwili inicjacji prognozy (czwartek 21 grudnia 6:00 UTC) centrum wiru cyklonalnego znajdowało się nad Morzem Norweskim, tuż poza granicą domeny modelu ALARO (rys. 20). Największy horyzontalny gradient ciśnienia w obrębie tej domeny (pomiędzy klinem wyżu nad Pirenejami a zatoką niskiego ciśnienia nad Morzem Norweskim) wynosił ok. 90 hPa. W rezultacie w zachodniej części Europy notowany był silny wiatr z kierunków zachodnich o prędkości średniej 20-30 węzłów (10-15 m/s), w porywach do ponad 40 węzłów (20 m/s) (rys. 21). O ile na wysokości 700 hPa rozkład ciśnienia atmosferycznego jest generalnie podobny do tego co przy powierzchni (na granicy domeny obliczeniowej izohipsy wykazują zagięcie cykloniczne, co w konfrontacji z mapą TB700, pozwala wyciągnąć wniosek, że po za domeną znajduje się centrum cyrkulacji cyklonicznej), to na wysokości 500 hPa kształt izohips nad Morzem Północnym nie wskazuje na to, by w pobliżu znajdował się wir cyklonalny (co oczywiście może być mylne, z tego względu, że oś niżu jest pochylona w kierunku NW, w kierunku chłodniejszej masy powietrza arktycznego, co skutkuje tym, że sam ośrodek jeśli takowy zostałby wysymulowany numerycznie, jak i izohipsy zakrzywione cyklonicznie znajdują się poza domeną obliczeniową modelu, co nie pozwala na ocenę rozwoju niżu). Na mapach TB bardzo wyraźny jest za to klin wyżu azorskiego (Rys. 22). Na mapie  $TW_{1000}^{500}$  doskonale widać, że do Polski od zachodu zbliża się adwekcja ciepła. Symulacja numeryczna pionowego uskoku wiatru (0-1 km, rys. 23) prognozowały znaczne wartości, przekraczające 10 m/s zarówno w zachodniej, częściowo centralnej i południowo zachodniej części kraju. Z kolei w warstwie 0-3 km, wartości uskoku wiatru wynosiły do 20 m/s. Te zwiększone wartości uskoku wiatru wskazywały na to, że ich przyczyn należy upatrywać albo w intensywnej konwekcji lub w aktywnych frontach atmosferycznych położonych w dobrze wyrażonych głębokich zatokach, ewentualnie przyczyną uskoku może być szybko przemieszczające się układy baryczne, tzn. niże nurkujące, co zostało potwierdzone dalszym rozwojem sytuacji synoptycznej. Największa odbiciowość (ok. 20 dBz) była prognozowana w strefie frontu okluzji znajdującego się nad Danią (rys. 24).



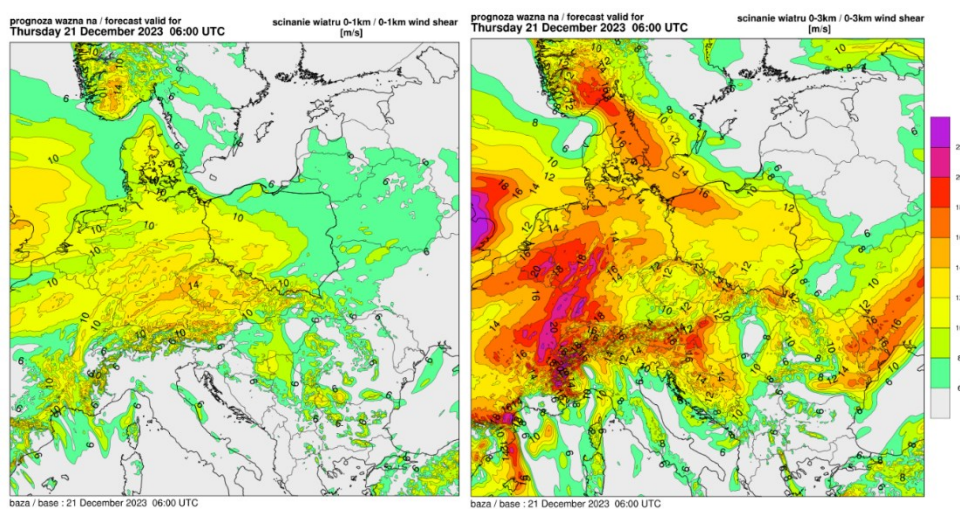
Rys. 20. Prognoza ciśnienia atmosferycznego oraz kierunku i prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.



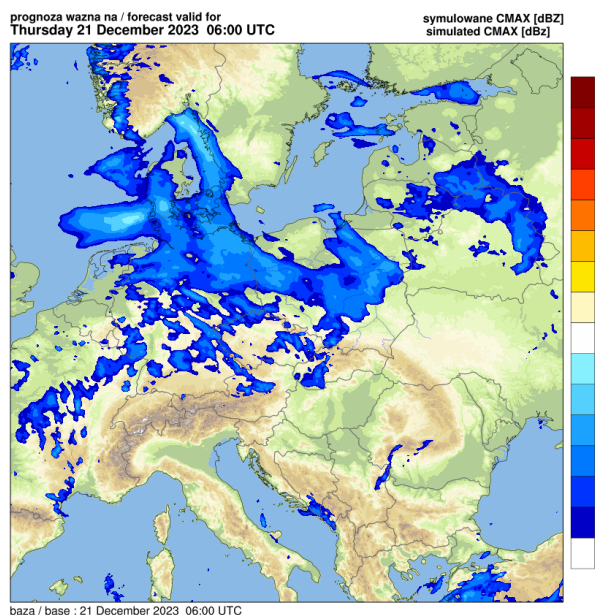
Rys. 21. Prognoza maksymalnych porywów wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.



Rys. 22. Prognoza geopotencjału na wysokości 700 hPa [gp dam] (po lewej), geopotencjału na wysokości 500 hPa i topografii barycznej względnej [gp dam] (po prawej) wg modelu ALARO na godz. 6 UTC 21.12.2023.



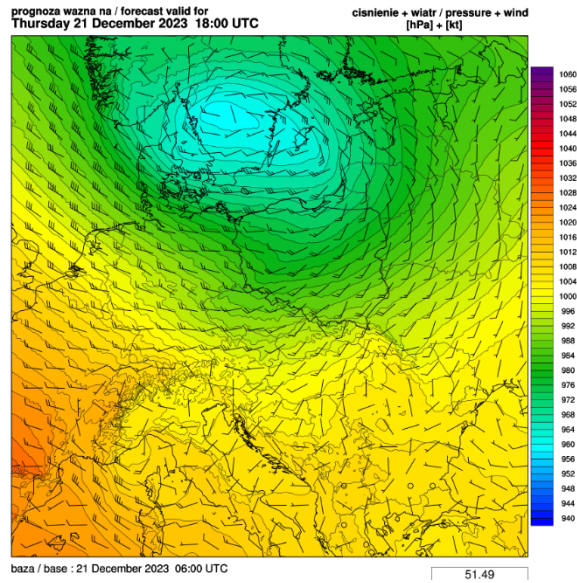
Rys. 23. Prognoza ścinania wiatru pomiędzy powierzchnią ziemi a wysokościami 1 km (po lewej) oraz 3 km (po prawej) wg modelu ALARO.



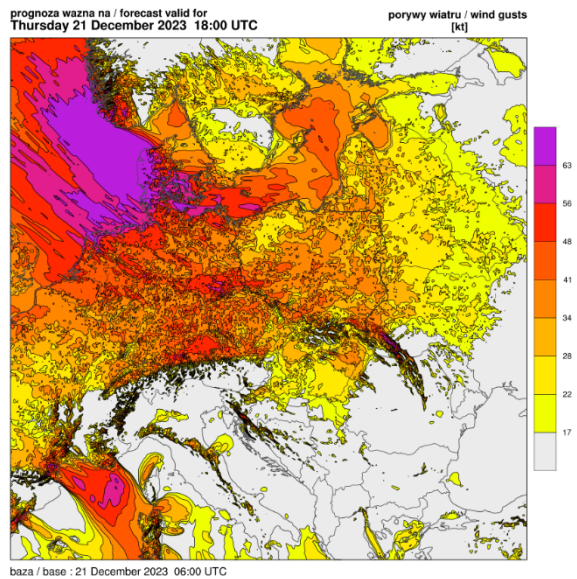
Rys. 24. Prognoza odbiciowości radarowej CMAX [dBz] wg modelu ALARO.

Według prognozy numerycznej po 12 godzinach (21 grudnia 18:00 UTC), centrum wiru cyklonalnego powinno przemieścić się w kierunku ESE i znajdować się nad południową Szwecją (rys. 25). Według symulacji ciśnienie powinno obniżyć się poniżej 960 hPa. Przy powierzchni ziemi wiatr powinien wieć z kierunku SW na obszarze kraju, a jego średnia prędkość wynieść ok. 20 węzłów (10 m/s), najwięcej zaś nad Zatoką Szczecińską (ok. 35 węzłów (17,5 m/s)). Porywy wiatru niemal w całej Polsce powinny przekraczać 28 węzłów (14 m/s), z największymi wartościami na wybrzeżu Bałtyku - ok. 50 węzłów (25 m/s) (rys. 26). Według modelu ALARO największy horyzontalny gradient ciśnienia, a zatem największa prędkość wiatru, występować miała na SW od centrum niżu (tj. już przy wrastającej tendencji ciśnienia) – na Morzu Północnym i zachodnim wybrzeżu Danii porywy przekraczały 63 węzły (31,5 m/s). Przemieszczający się wir cykloniczny rozbudowywał się ku górze co widać na symulacjach pola geopotencjału na poziomie 700 hPa oraz 500 hPa (zamknięta izohipsa 500 gp dam, rys. 27). Nad Polską izohipsy na obu tych poziomach były gięte zatokowo. Na mapie  $TW_{1000}^{500}$  zaznaczony był nad Polską klin ciepła, z osią przemieszczającą się nad Polska. Od północnego-zachodu zaznaczył się dodatni kąt adwekcji wskazujący na adwekcję chłodu. Analizując prognostyczne pole uskoku wiatru (rys. 28), należało spodziewać się ścinania wiatru w Alpach oraz w Sudetach i Karpatach, a także na Dolnym Śląsku. Lokalnie wartości uskoku wiatru przekraczały miały 20 m/s. Podobne wnioski możemy wysnuć, analizując mapę prognozowanej odbiciowości (rys. 29). Oprócz strefy frontowej, warto zwrócić uwagę także na nieorganizowaną konwekcję wewnątrzmasową (za frontem chłodnym) obserwowaną nad północnymi Niemcami i Pomorzem Zachodnim.

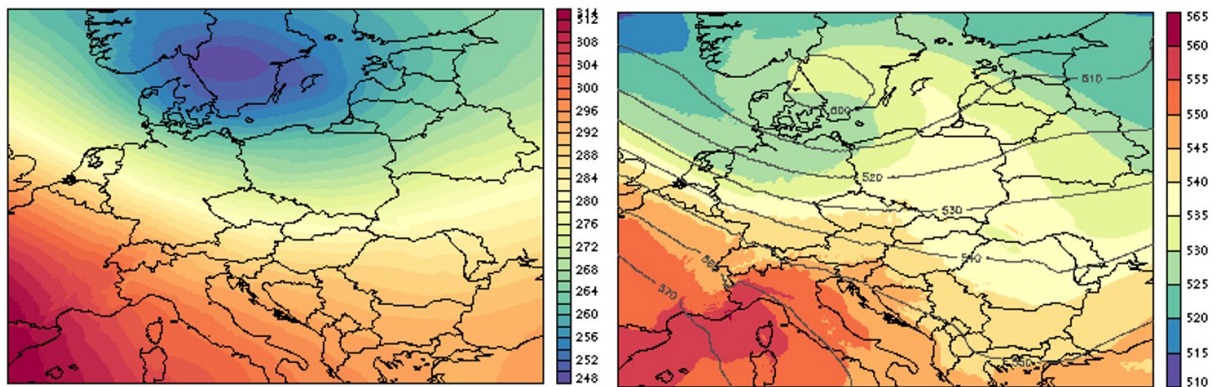




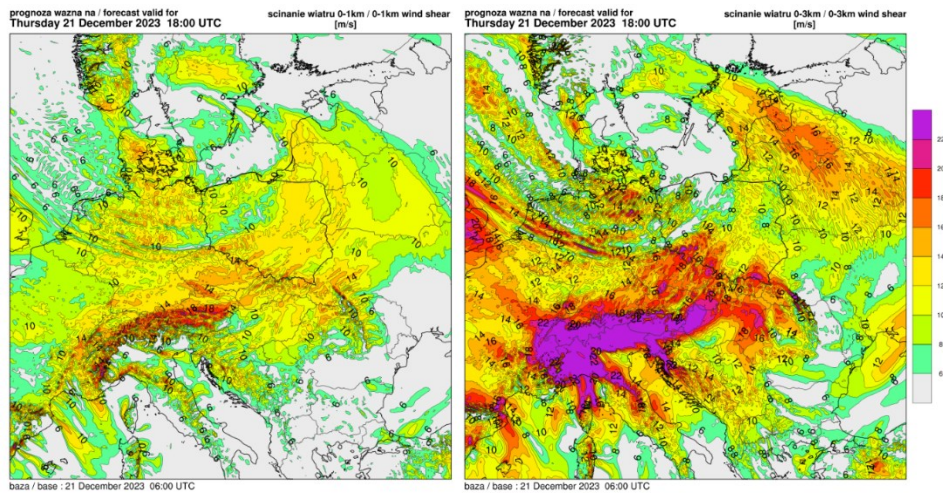
Rys. 25. Prognoza ciśnienia atmosferycznego oraz kierunku i prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.



Rys. 26. Prognoza maksymalnych porywów wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.



Rys. 27. Prognoza geopotencjału na wysokości 700 hPa [gp dam] (po lewej), geopotencjału na wysokości 500 hPa i topografii barycznej względnej [gp dam] (po prawej) wg modelu ALARO na godz. 18 UTC 21.12.2023.



Rys. 28. Prognoza ścinania wiatru pomiędzy powierzchnią ziemi a wysokościami 1 km (po lewej) oraz 3 km (po prawej) wg modelu ALARO.

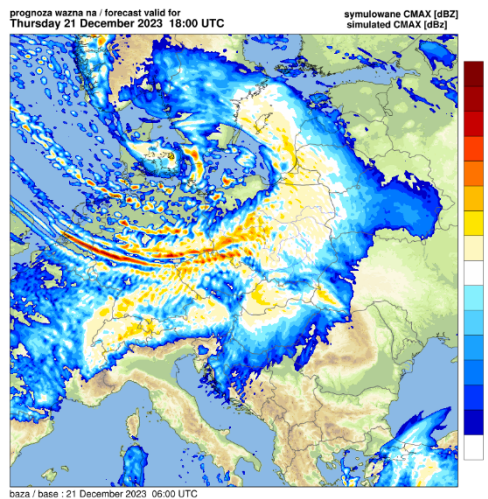
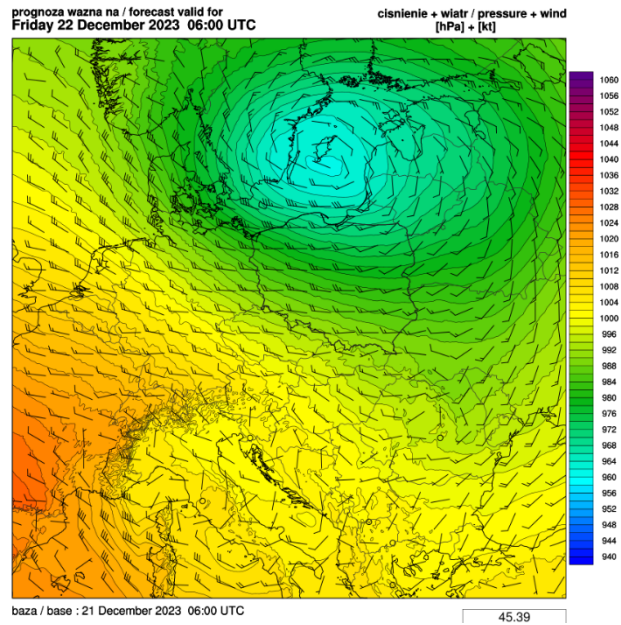


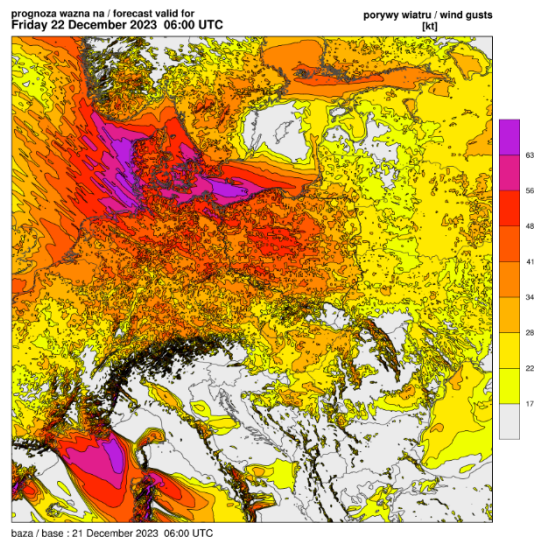
Fig. 29. Prognoza odbiciowości radarowej CMAX [dBz] wg modelu ALARO.

Po kolejnych 12h (22 grudnia 6:00 UTC) centrum wiru cyklonalnego, według symulacji numerycznych, przemieściło się nieznacznie na wschód i znajdowało się nad Gotlandią (rys. 30). Ciśnienie w tym punkcie było już wyższe niż w poprzednim kroku analizy, co sygnalizuje wejście niżej w fazę wypełniania. Prognozowana średnia prędkość wiatru w Polsce wynosiła od ok. 20 węzłów (10m/s) do ok. 40 węzłów (20 m/s) na Pomorzu Zachodnim. Porywy w większości kraju powinny przekraczać 28 węzłów (14 m/s), najwięcej w Wielkopolsce (do ok. 50 węzłów (25 m/s)) oraz na wybrzeżu (50-60 węzłów, (25-30 m/s), rys. 31). Do wysokości 500 hPa dobrze wyodrębniona cyrkulacja cykloniczna (zamknięte izohipsy). Izohipsy nad Polską ułożyły się w wyraźną zatokę o mniej więcej południkowej osi, w której zalega front. Z pola izohips względnych (mapy  $TW_{1000}^{500}$ ) wynikało, że Polska powinna znajdować się w zatoce chłodu. Na prognostycznych mapach ścinania wiatru oraz odbiciowości maksymalnej ponownie zwraca uwagę obszar środkowych Niemiec i pogranicza polsko-niemieckiego, gdzie lokalnie wartości uskoków wiatru przekraczały 15 m/s w przypadku uskoku 0-1 km oraz 20 m/s w przypadku 0-3 km, natomiast w przypadku odbiciowości maksymalnej widać izolowane komórki opadów pochodzenia konwekcyjnego (rys. 33). Liniowa struktura wysokich wartości uskoków wiatru 0-3 km nie pokrywa się z żadnym frontem rysowanym przez służby meteorologiczne, prawdopodobnie można było spodziewać się frontu drugorzędowego.

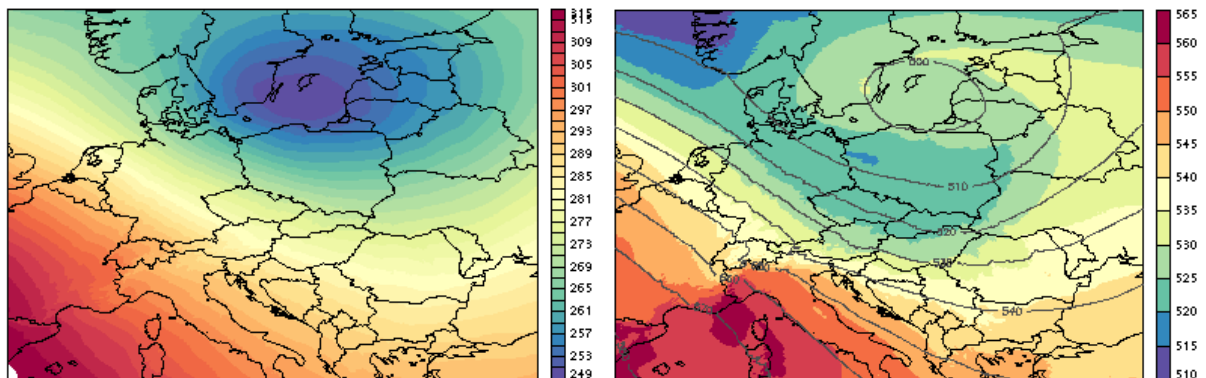




Rys. 30. Prognoza ciśnienia atmosferycznego oraz kierunku i prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.

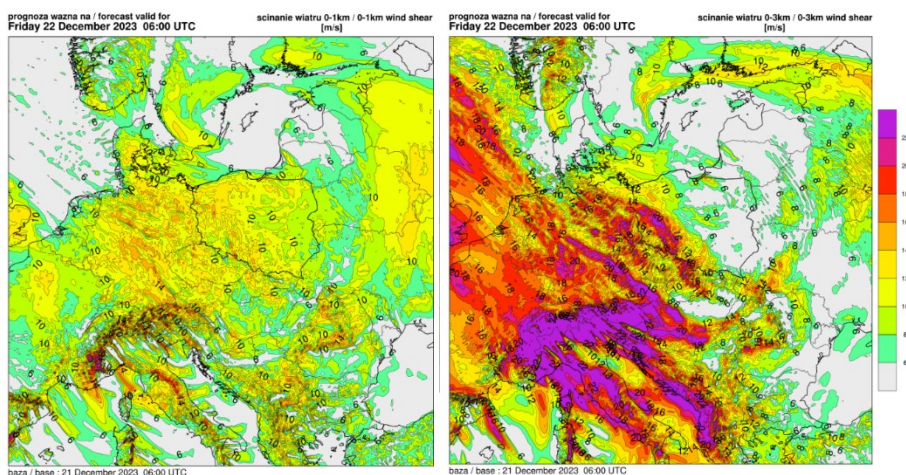


Rys. 31. Prognoza maksymalnych porywów wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.

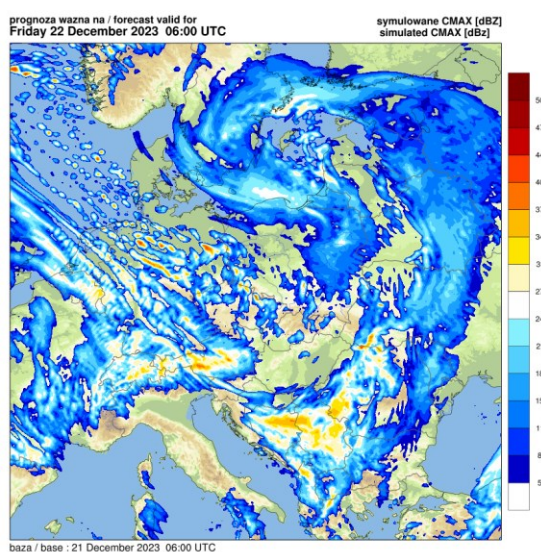


Rys. 32. Prognoza geopotencjału na wysokości 700 hPa [gp dam] (po lewej), geopotencjału na wysokości 500 hPa i topografii barycznej względnej [gp dam] (po prawej) wg modelu ALARO na godz. 6 UTC 22.12.2023.



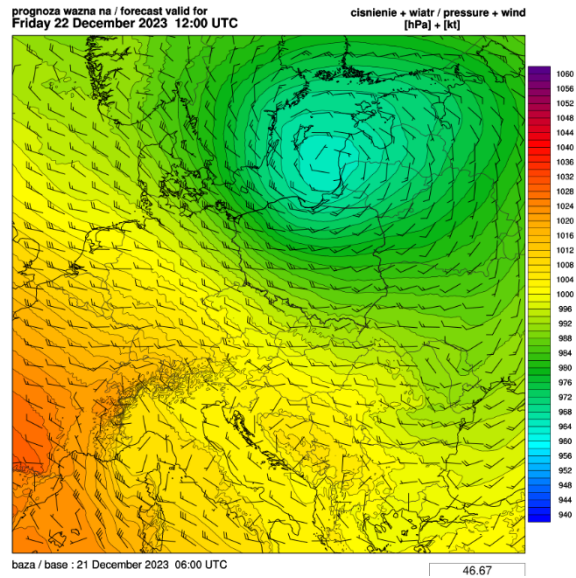


Rys. 33. Prognoza ścinania wiatru pomiędzy powierzchnią ziemi a wysokościami 1 km (po lewej) oraz 3 km (po prawej) wg modelu ALARO.

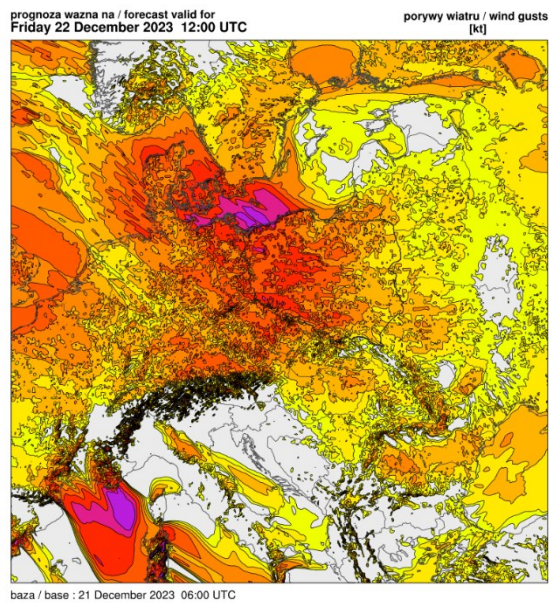


Rys. 34. Prognoza odbiciowości radarowej CMAX [dBZ] wg modelu ALARO.

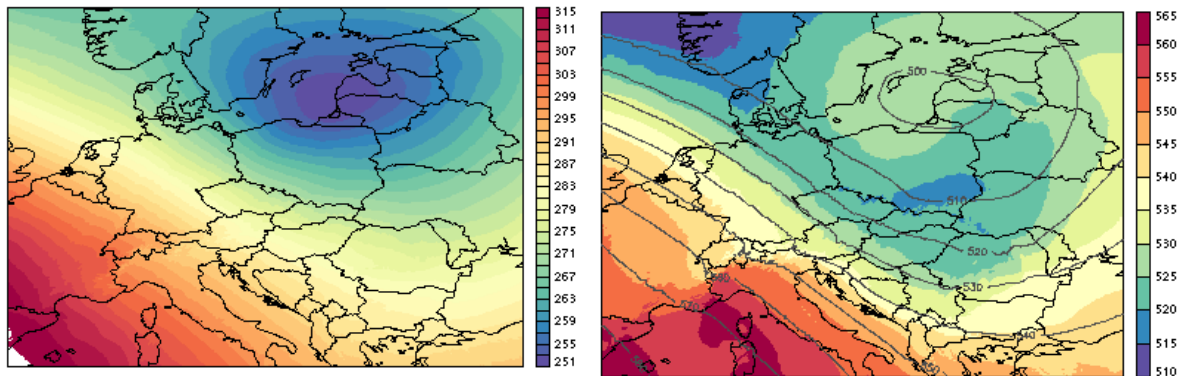
Ośrodek niżowy kontynuował wędrówkę na wschód i tego samego dnia o godz. 12 UTC znajdowało się u wybrzeży Litwy i Łotwy (rys. 35). Rozkład prędkości wiatru był podobny jak w poprzednio analizowanym terminie. Dużej zmianie nie uległo również pole porywów wiatru (rys. 36). Prognozowane były silniejsze porywy w zachodniej Polsce, zwłaszcza na Dolnym Śląsku, Wielkopolsce oraz Pomorzu Zachodnim (ok. 50 węzłów-25 m/s). Naturalnie, największe porywy prognozowane były dla bałtyckiego wybrzeża (ponad 60 węzłów (30 m/s) na Pomorzu Zachodnim). Bez większych zmian wyglądała sytuacja baryczna na wyższych poziomach izobarycznych (rys. 37). Na mapach ścinania wiatru (rys. 38) zaznaczone były dwa obszary o podwyższonych wartościach uskoków wiatru: pierwszy obejmujący Pomorze Zachodnie, Wielkopolskę oraz Kujawy (0-1 km: >12 m/s, 0-3 km: >15 m/s), oraz drugi obejmujący Karpaty oraz Podkarpacie, o podobnych wartościach uskoków. W świetle prognozowanej odbiciowości maksymalnej (rys. 39), to właśnie na południu Polski prognozowane były komórki opadowe z intensywnym opadem deszczu pochodzenia konwekcyjnego (do ok. 40 dBZ). W przypadku północnej Polski, strefa opadów również wykazywała charakter przelotny pomimo niższej odbiciowości (do 25 dBZ), należy mieć na względzie, że zimowe chmury Cb charakteryzują się niższą miąższością oraz inną mikrofizyką, w porównaniu z letnimi chmurami Cb, co potwierdziły obserwacje.



Rys. 35. Prognoza ciśnienia atmosferycznego oraz kierunku i prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.

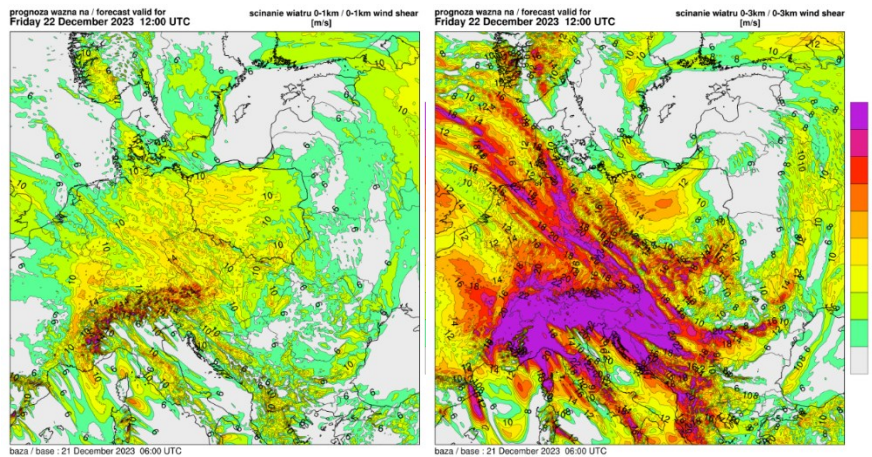


Rys. 36. Prognoza maksymalnych porywów wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.

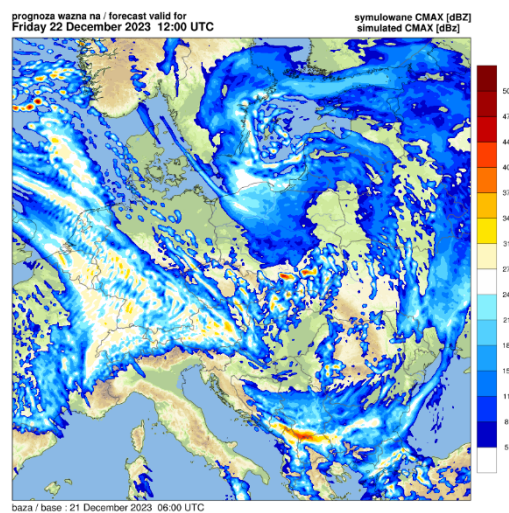


Rys. 37. Prognoza geopotencjału na wysokości 700 hPa [gp dam] (po lewej), geopotencjału na wysokości 500 hPa i topografii barycznej względnej [gp dam] (po prawej) wg modelu ALARO na godz. 12 UTC 22.12.2023.





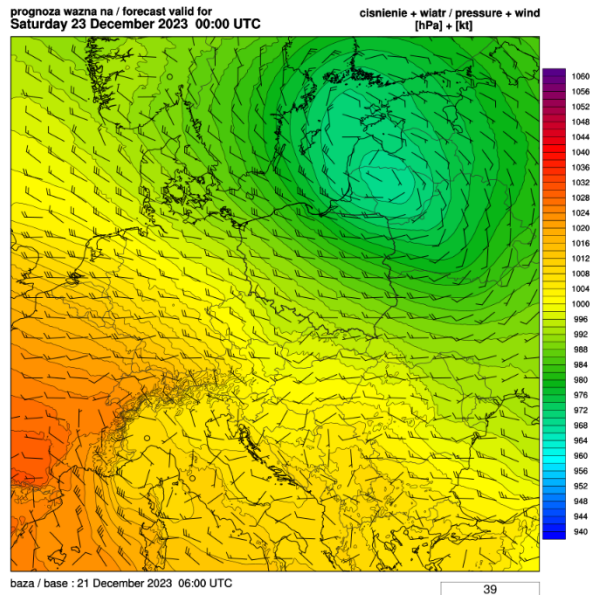
Rys. 38. Prognoza ścinania wiatru pomiędzy powierzchnią ziemi a wysokościami 1 km (po lewej) oraz 3 km (po prawej) wg modelu ALARO.



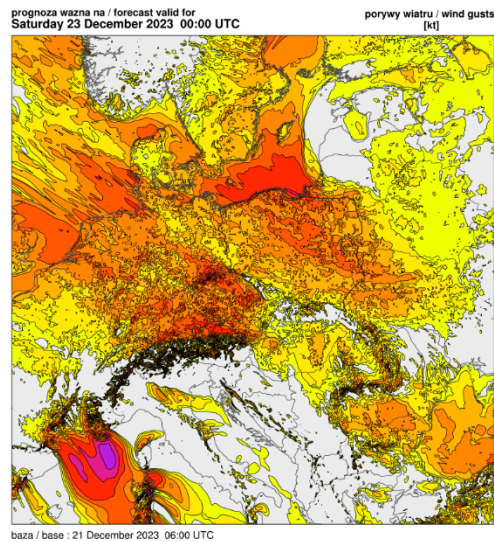
Rys. 39. Prognoza odbiciowości radarowej CMAX [dBz] wg modelu ALARO.

Z kolejnych kroków prognozy numerycznej wynikało (23 grudnia 00:00 UTC), że wir cyklonalny wkroczy na ląd i będzie wypełniał się – ciśnienie w jego centrum wyniesie ok. 970 hPa (rys. 40). Średnia prędkość wiatru na obszarze Polski prognozowana była na ok. 20 węzłów (10 m/s), największa nad Zatoką Gdańską – ok. 35 węzłów (17,5 m/s). Według prognozy osłabnąć także miały porywy wiatru – prędkość > 50 węzłów (>25 m/s), prognozowana była już tylko na wybrzeże Bałtyku, natomiast w głębi lądu porywy wynosiły 30-40 węzłów (15-20 m/s) (rys. 41). Ośrodek niżowy nadal obecny był na poziomach 700 i 500 hPa, jednak izohipsy nad obszarem Polski nie miały już wyraźnego ugięcia zatokowego. Prognozowane wartości uskoku wiatru 0-1 km wynosiły ok. 10 m/s w przeważającej części kraju (rys. 42). Większe wartości uskoku wiatru były prognozowane w warstwie 0-3 km – zwraca uwagę zwłaszcza liniowa struktura ciągnąca się od Podkarpacia do Pomorza Zachodniego z wartościami przekraczającymi 22 m/s. Na mapie odbiciowości maksymalnej widzimy, że strukturze tej nie towarzyszyły żadne opady (rys. 44).

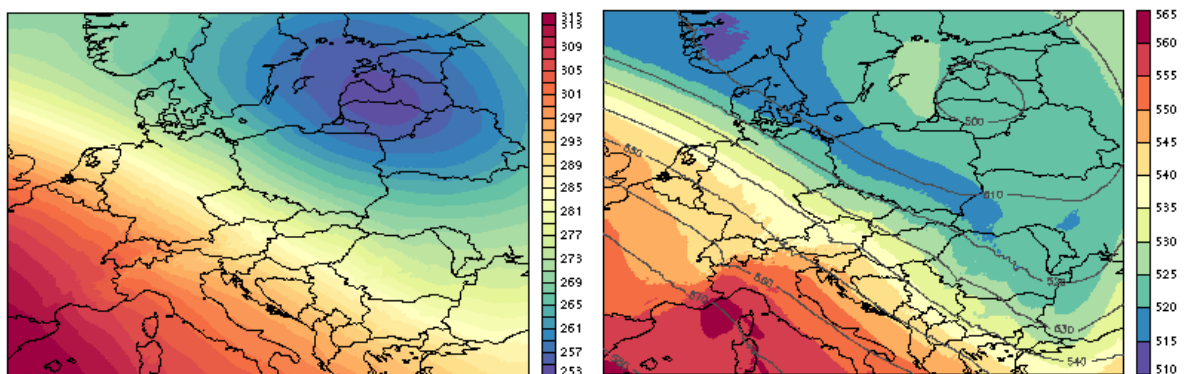




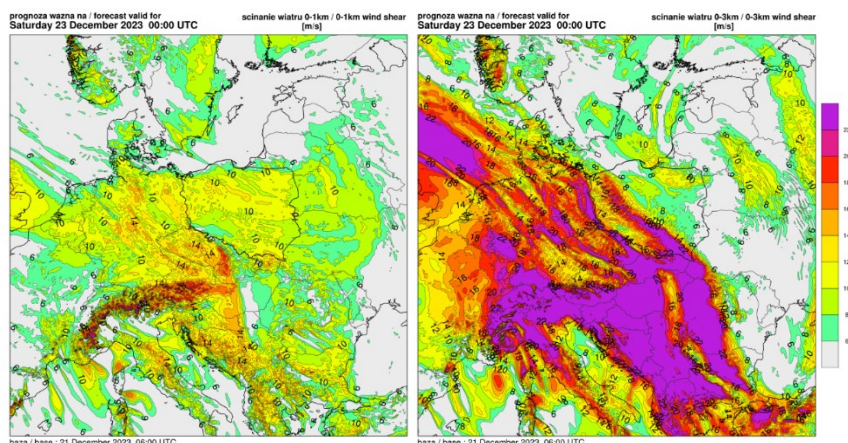
Rys. 40. Prognoza ciśnienia atmosferycznego oraz kierunku i prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.



Rys. 41. Prognoza maksymalnych porywów wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu ALARO.



Rys. 42. Prognoza geopotencjału na wysokości 700 hPa [gp dam] (po lewej), geopotencjału na wysokości 500 hPa i topografii barycznej względnej [gp dam] (po prawej) wg modelu ALARO na godz. 00 UTC 23.12.2023.



Rys. 43. Prognoza ścinania wiatru pomiędzy powierzchnią ziemi a wysokościami 1 km (po lewej) oraz 3 km (po prawej) wg modelu ALARO.

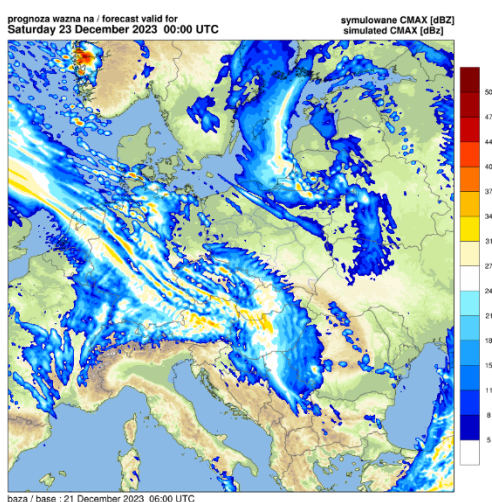
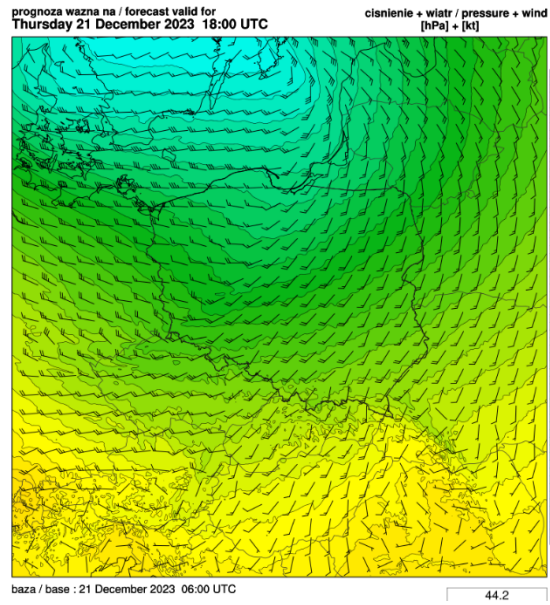


Fig. 44. Prognoza odbiciowości radarowej CMAX [dBZ] wg modelu ALARO.

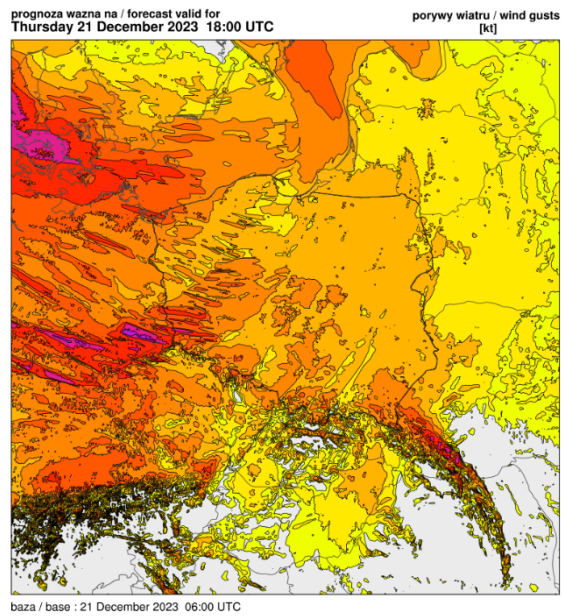
### Symulacje z modelu AROME

Z uwagi na mniejszą domenę modelu AROME, analizę rozpoczęto od prognozy na 21 grudnia 2023 roku, o godzinie 18 UTC, gdy ośrodek niżowy znajdował się nad południową Szwecją. Ze względu na duże podobieństwo map TB i TW otrzymanych z symulacji modelem AROME do wyników z modelu ALARO (który jest źródłem warunków brzegowych dla modelu AROME), skupiono się na parametrach powierzchniowych i konwekcyjnych.

21 grudnia o 18 UTC prognoza ciśnienia i średniej prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi modelu AROME była zbliżona do prognozy ALARO. Z symulacji numerycznych wynikało, że centrum wiru cyklonalnego zlokalizowane było nad południową Szwecją, a w Polsce kierunek wiatru powinien być z południowego zachodu, przeważnie o średniej prędkości ok. 20 węzłów (10 m/s), maksymalnych wartości należało się spodziewać na zachodnim wybrzeżu Bałtyku – do ok. 35 węzłów (17,5 m/s) (rys. 45). Charakterystyczne ugięcie izobar oraz zmiana kierunku wiatru wzdłuż linii Zgorzelec – Pomorze Gdańskie sygnalizowało istnienie w tym rejonie zatoki z zalegającym w niej frontem. Strefa ta jest bardziej widoczna na kolejnych mapach, np. na mapie porywów wiatru (co nie było odwzorowane w symulacjach modelem ALARO). Porywy wiatru na Dolnym Śląsku i w Wielkopolsce miały przekraczać 34 węzłów (17 m/s), a punktowo nawet 50 węzłów (25 m/s) (rys. 46). Z kolei porywy nad Bałtykiem osiągać miały prędkość rzędu 40 węzłów (20 m/s), co jest wartością nieco mniejszą w porównaniu z symulacjami modelem ALARO. Znacznie wyższe są prognozy uskoku wiatru 0-1 km - wg AROME w całej strefie przedfrontowej na północy kraju oraz w ciepłym wycinku niżu wartości te mogłyby lokalnie przekraczać 15-20 m/s (rys. 47). Uskok wiatru w warstwie 0-3 km prognozowany jest w sposób zbliżony do wyników otrzymanych z ALARO.

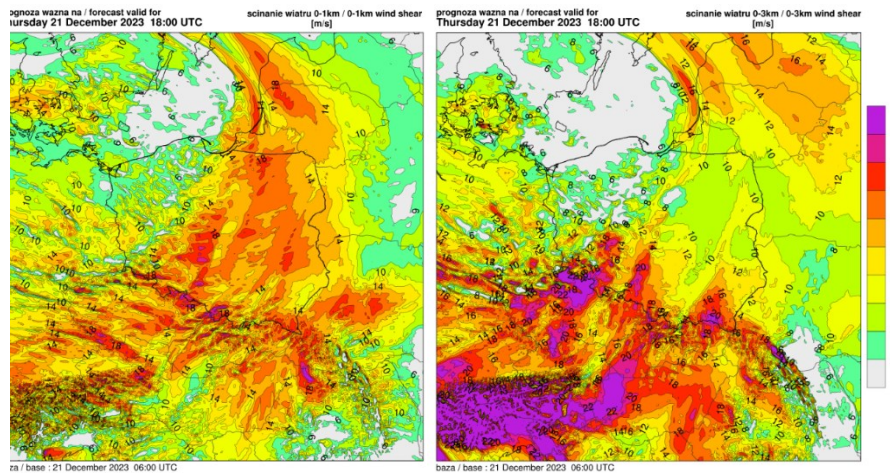


Rys. 45. Prognoza ciśnienia atmosferycznego oraz kierunku i prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu AROME.

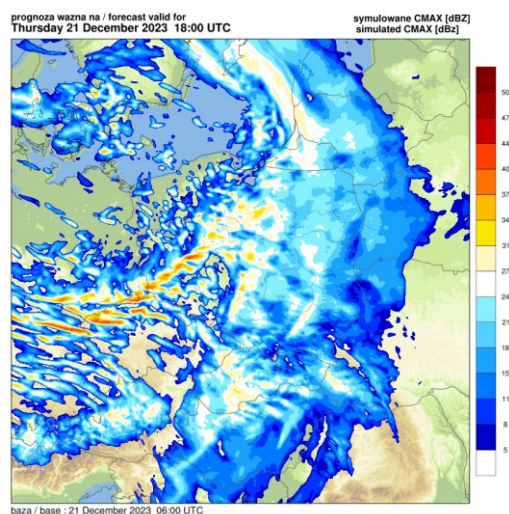


Rys. 46. Prognoza maksymalnych porywów wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu AROME.



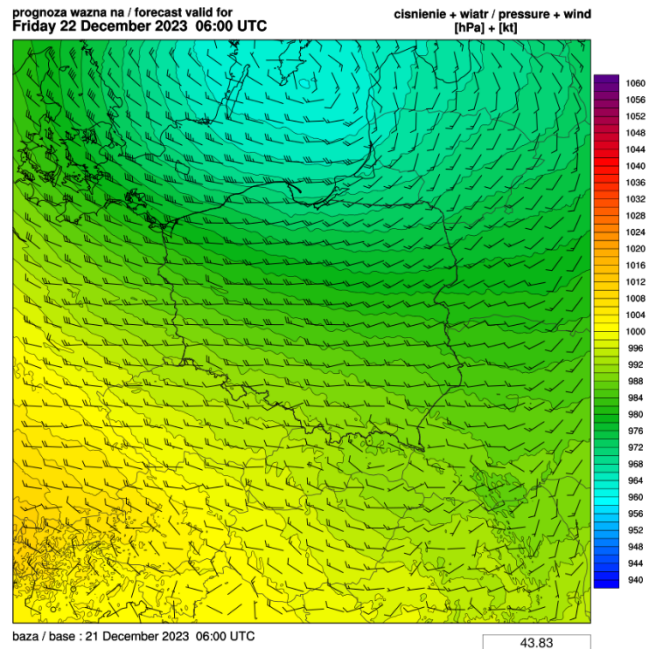


Rys. 47. Prognoza ścinania wiatru pomiędzy powierzchnią ziemi a wysokościami 1 km (po lewej) oraz 3 km (po prawej) wg modelu AROME.

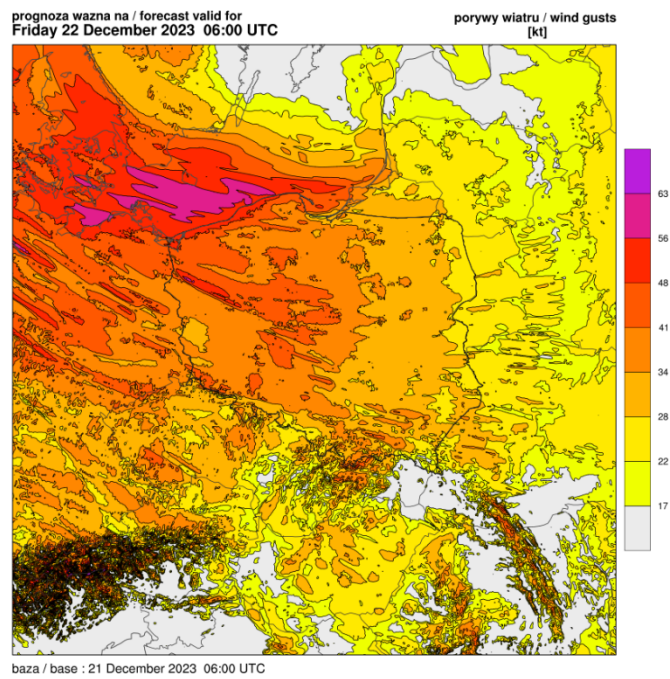


Rys. 48. Prognoza odbiciowości radarowej CMAX [dBZ] wg modelu AROME.

Po 12 godzinach (22 grudnia 6:00 UTC), prognostyczne centrum wiru cyklonalnego znajdowało się nad Gotlandią. Średnia prędkość wiatru na wybrzeżu Bałtyku miała osiągać wartość do 40 węzłów (20 m/s), natomiast w głębi lądu do ok. 30 węzłów (15 m/s), co jest wartością nieco wyższą niż w przypadku ALARO (rys. 49). Rozkład przestrzenny porywów prognozowany był podobny – wartości ponad 40 węzłów (20 m/s) miały wystąpić w Wielkopolsce na Pomorzu Zachodnim oraz na wybrzeżu Bałtyku (rys. 50). Prognozowane wartości uskoku wiatru 0-3 km są analogiczne względem tych prognozowanych przez ALARO, natomiast w przypadku uskoku wiatru w warstwie 0-1 km różnice są większe (rys. 51). Zwłaszcza dotyczy to obszaru Pomorza Gdańskiego, Warmii i Mazowsza, gdzie wartości te przekraczały 14 m/s. Wartości te niewątpliwie wskazują na zwiększoną turbulencję oraz konwekcję a także nie wykluczone groźniejsze zjawiska jak np. trąbą powietrza, co wymagałoby potwierdzenia pozostałymi wskaźnikami. Obszar ten w przybliżeniu pokrywa się ze strefą opadów (prognozowana odbiciowość maksymalna, rys. 52) związaną z frontem zokludowanym związanym z ośrodkiem niżowym. W porównaniu do symulacji modelem ALARO, strefa ta jest nieco bardziej nieciągła, większa jest także wartość maksymalnej odbiciowości (ponad 30 dBz u wybrzeży Bałtyku na wysokości Mierzei Helskiej).

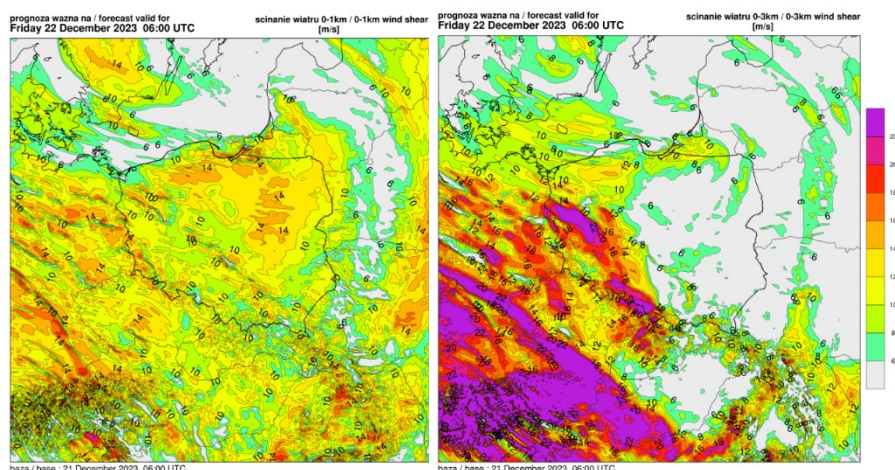


Rys. 49. Prognoza ciśnienia atmosferycznego oraz kierunku i prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu AROME.

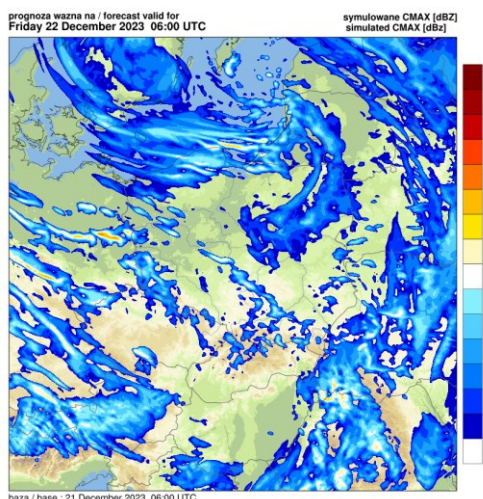


Rys. 50. Prognoza maksymalnych porywów wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu AROME.





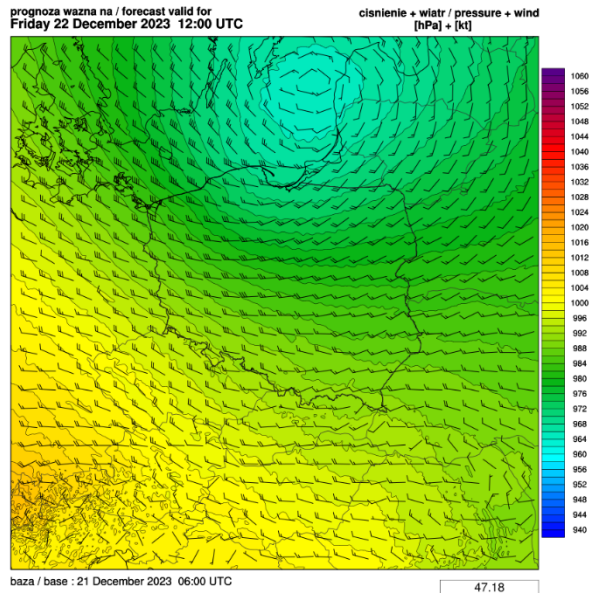
Rys. 51. Prognoza ścinania wiatru pomiędzy powierzchnią ziemi a wysokościami 1 km (po lewej) oraz 3 km (po prawej) wg modelu AROME.



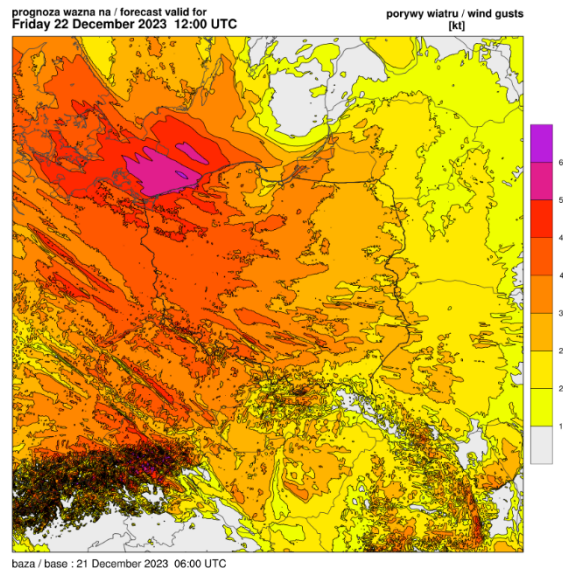
Rys. 52. Prognoza odbiciowości radarowej CMAX [dBZ] wg modelu AROME.

Do godz. 12 UTC tego samego dnia, według prognoz, centrum wiru cyklonalnego powinno przemieścić się nieznacznie na wschód i znajdować się u wybrzeży Łotwy (rys. 53). Prognostyczne wartości średniej prędkości wiatru powinny osiągnąć od 40-45 węzłów (20-22,5 m/s) u wybrzeży Bałtyku do 20 - 30 węzłów (do 10 - 15 m/s) w głębi kraju. Wartości te są zbliżone do prognozy ALARO. W wypadku porywów prognozy dla wybrzeża Bałtyku były nieco łagodniejsze (do 60 węzłów, do 30 m/s). W głębi lądu podobnie – izotacha 48 węzłów (24 m/s) ma zdecydowanie mniejszy zasięg niż w przypadku ALARO i ogranicza się do Pomorza Zachodniego (rys. 54). Podobnie jak w poprzednim terminie analizy, znaczne różnice występują w przypadku prognozy uskoku wiatru w warstwie 0-1 km (rys. 55). Model AROME prognozował wyraźną strefę podwyższonych wartości ścinania wiatru rozciągającą się południkowo od Ziemi Łódzkiej po Zatokę Gdańską a równoleżnikowo od Pomorza Zachodniego po Mazury. Wartości uskoku w tej strefie miały przekraczać 14 m/s, a lokalnie także 16 m/s. Model ALARO nie prognozował tak wysokich wartości, ponadto strefa podwyższonych wartości była przesunięta bardziej na zachód. Podobne wnioski dotyczą także uskoku wiatru w warstwie 0-3 km. Tutaj model AROME także prognozował nieco wyższe wartości w północnej części kraju (ponad 18 m/s), a także na Lubelszczyźnie, natomiast model ALARO przewidywał taką strefę bardziej na Podkarpaciu. Analiza prognozowanej maksymalnej odbiciowości radarowej (rys. 56) wskazuje na większe niż w ALARO wartości tego parametru w strefie opadów znajdującej się na północy kraju (do 30 dBz), natomiast mniejsze w przypadku izolowanych konwekcyjnych komórek opadowych na południu kraju (od Małopolski po Lubelszczyznę) – do 37 dBz.

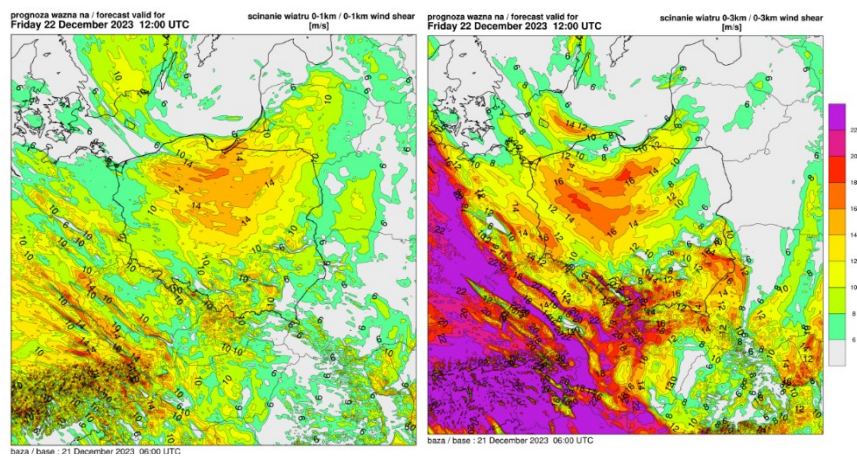




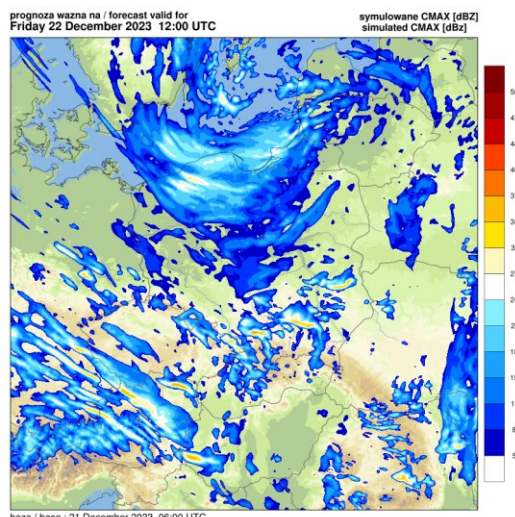
Rys. 53. Prognoza ciśnienia atmosferycznego oraz kierunku i prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu AROME.



Rys. 54. Prognoza maksymalnych porywów wiatru przy powierzchni Ziemi wg modelu AROME.



Rys. 55. Prognoza ścinania wiatru pomiędzy powierzchnią ziemi a wysokościami 1 km (po lewej) oraz 3 km (po prawej) wg modelu AROME.



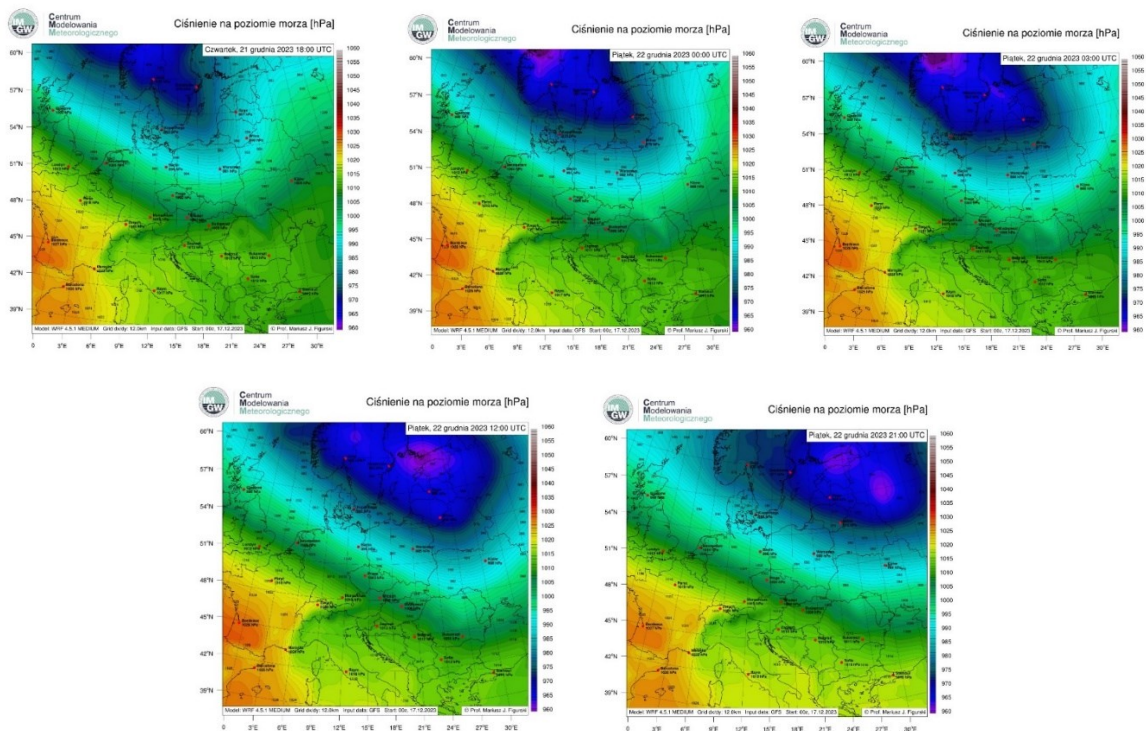
Rys. 56. Prognoza odbiciowości radarowej CMAX [dBz] wg modelu AROME.

### Wnioski

Modele ALARO i AROME przeważnie zgodnie prognozowały rozkład ciśnienia barycznego i średniej prędkości wiatru. W przypadku porywów istotniejsze różnice pod tym względem pojawiły się dopiero w piątek o godz. 12:00 UTC – model AROME prognozował je nieco słabsze niż ALARO. Największe różnice dotyczyły uskoku wiatru w warstwie 0-1 km, gdzie prognozy AROME systematycznie wskazywały na większe wartości tego parametru. W połączeniu z nieco większą prognozowaną odbiciowością maksymalną w strefie opadów na północy Polski, AROME wskazał na istotną rolę konwekcji w tym obszarze. Model ALARO z kolei prognozował największe natężenie zjawisk konwekcyjnych w pasie od Małopolski po Podkarpacie i Lubelszczyznę.

### 3. Niż *Pia* nad Polską z punktu widzenia innych modeli numerycznych

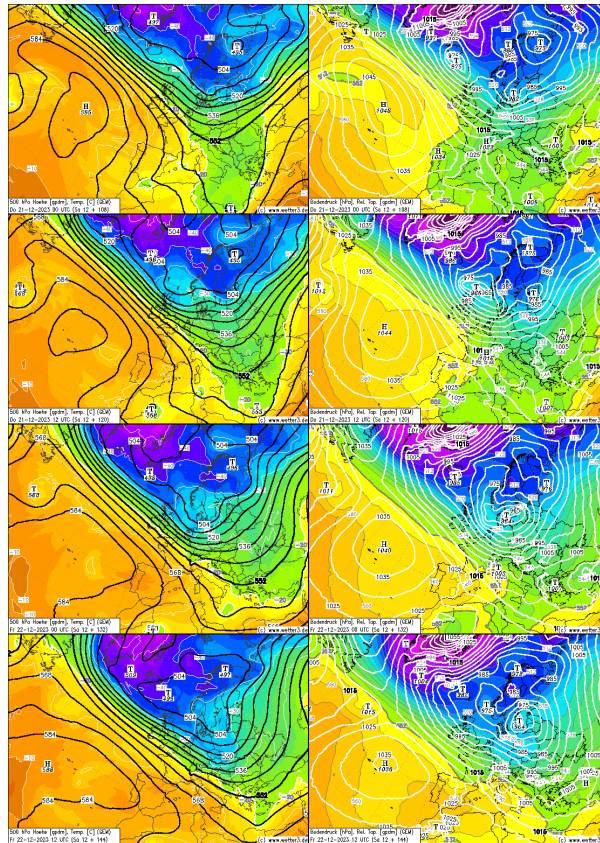
Z synoptycznego punktu widzenia już wcześniejsze symulacje numeryczne modelem ECMWF, WRF dały podstawę do zaprognozowania silnego wiatru ww. analizowanym terminie. Z symulacji wykonanych 17 grudnia 2023 roku wynikało, że około 20 grudnia 2023 roku w rejonie Islandii dojdzie do cyklogenezy. Na rys. 57 przedstawiono trajektorię układu niskiego ciśnienia, według modelu WRF.



Rys. 57. Trajektoria przemieszczania się układu niskiego ciśnienia (model WRF).

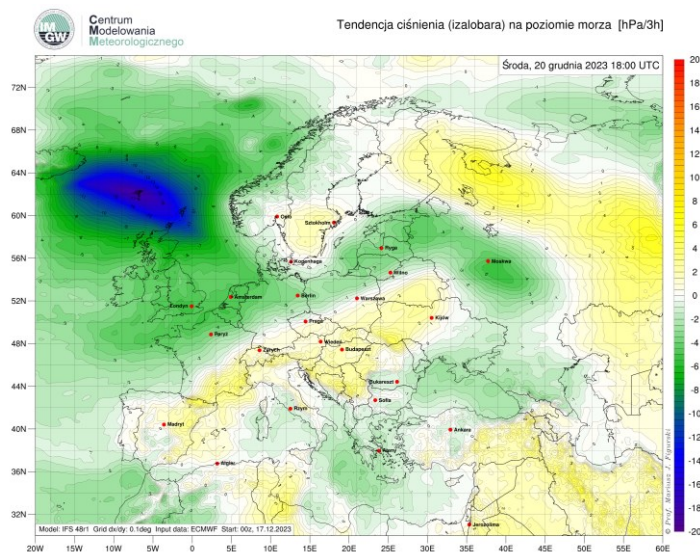
Z symulacji wynikało, że w czwartek ośrodek niskiego ciśnienia powinien zalegać jeszcze nad Morzem Norweskim. Następnie ośrodek powinien przemieszczać się nad Skandynawią i w piątek, 22 grudnia 2023 roku o godz. 12 UTC, ośrodek niżu powinien dotrzeć do Zat. Fińskiej. W drugiej połowie dnia, powinien powstać drugi ośrodek, który zalegać będzie nad zachodnią Rosją w pobliżu Łotwy i Estonii. Głębokość wiru powinna się zmniejszać, co świadczyłoby, że niż powinien wejść w fazę wypełniania w warstwie przyziemnej. Z analizy pola ciśnienia wynikało, że nad Polską powinien występować duży gradient ciśnienia, co oznaczałoby występowanie dużej średniej prędkości i porywów wiatru.





Rys. 58. Mapa topografii barycznej bezwzględnej TB500 wraz z polem temperatury na poziomie 500 hPa oraz pole ciśnienia naniesione na pole topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ .

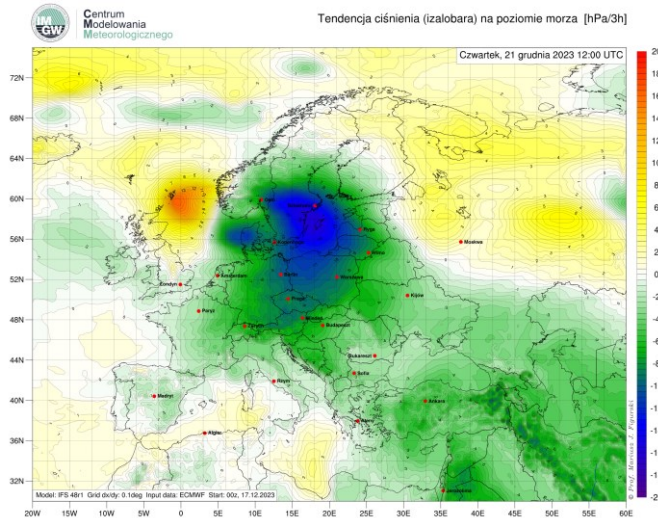
Symulacje numeryczne modelem GEM wskazywały również na występowanie głębokiego niżu, nieco płytszego i trajektorii bardziej przesuniętej w kierunku południowym w porównaniu z symulacjami wykonanymi modelem WRF. Model GEM sugerował również, że proces wypełniania powinien rozpocząć się wcześniej, a mianowicie w pierwszej części piątkowej doby. Na wysokości 500 hPa dolnego wiru cyklonicznego nie było zaznaczonego, a izohipsy gięte były na kształt zatoki.



Rys. 59. Pole tendencji ciśnienia na godzinę 18 UTC, 20.12. 2023 roku.

Z prognostycznego pola tendencji ciśnienia na godzinę 18 UTC, 20 grudnia 2023 roku (rys. 59), wynikało, że na ESE od Islandii występować będzie znaczna ujemna tendencja ciśnienia, z centrum izalobarycznym nad

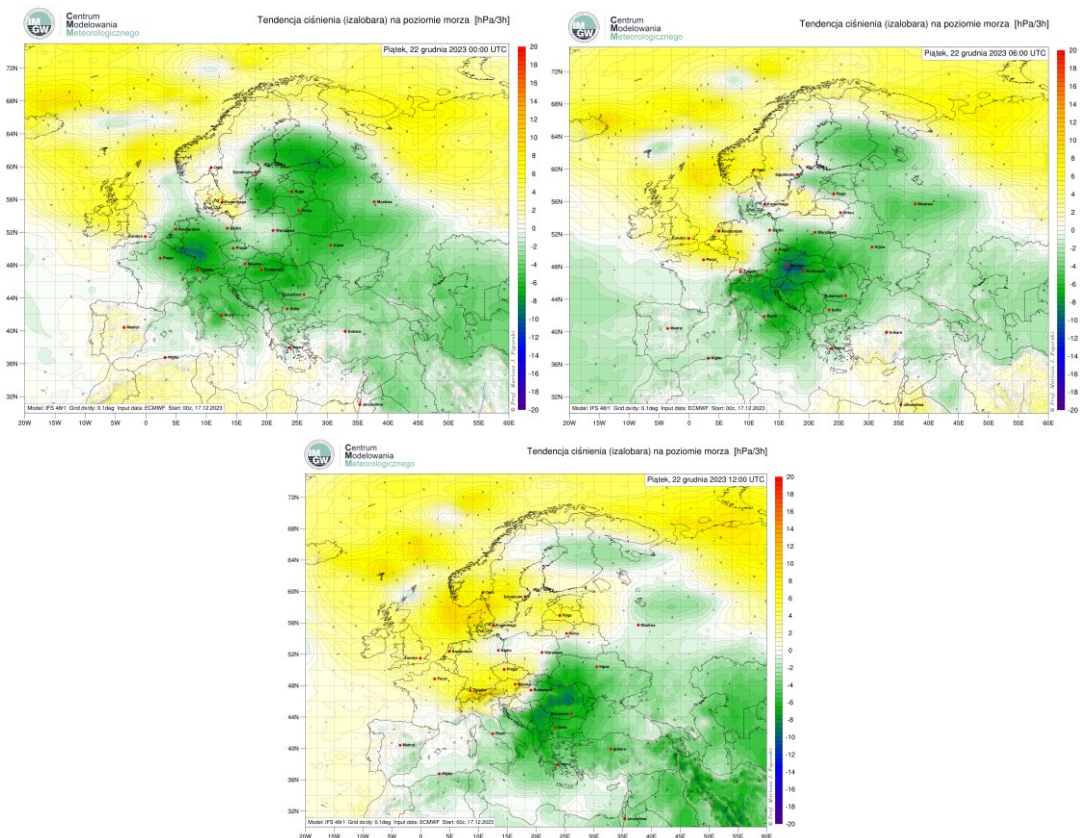
Atlantykiem (z tendencją około  $-20 \text{ hPa}/3 \text{ godz.}$ ). Zatem wir powinien się dość szybko pogłębiać i przemieszczać się w rejon Morza Północnego.



Rys. 60. Pole tendencji ciśnienia na godzinę 12 UTC, 21.12. 2023 roku.

Według prognoz w czwartek 21 grudnia 2023 roku, o godzinie 12 UTC, ujemne centrum izalobaryczne (obszar największych spadków) powinno dotrzeć nad Bałtyk. Tendencja ciśnienia zmniejszyć się powinna do  $-16 \text{ hPa}/3 \text{ godziny}$  w centrum izalobarycznym. A głębokość wiru cyklonicznego osiągnie wartość  $965 \text{ hPa}$  nad Morzem Północnym.

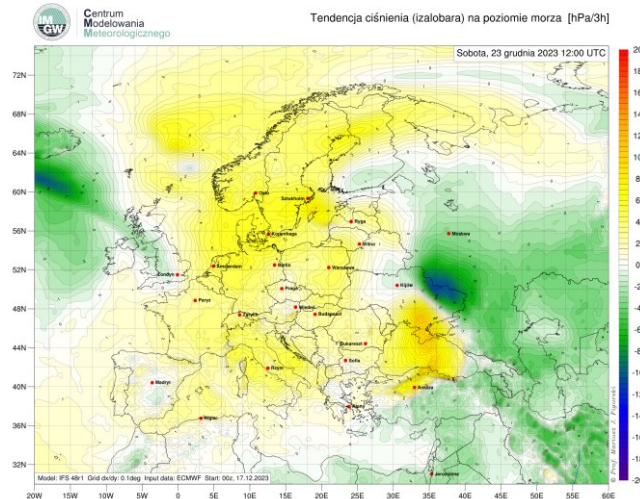
W piątek rano wir powinien przemieścić się nad Skandynawię, a ciśnienie w jego centrum obniżyć się do  $964 \text{ hPa}$  (według modelu WRF ciśnienie w ośrodku powinno obniżyć się poniżej  $960 \text{ hPa}$ ).



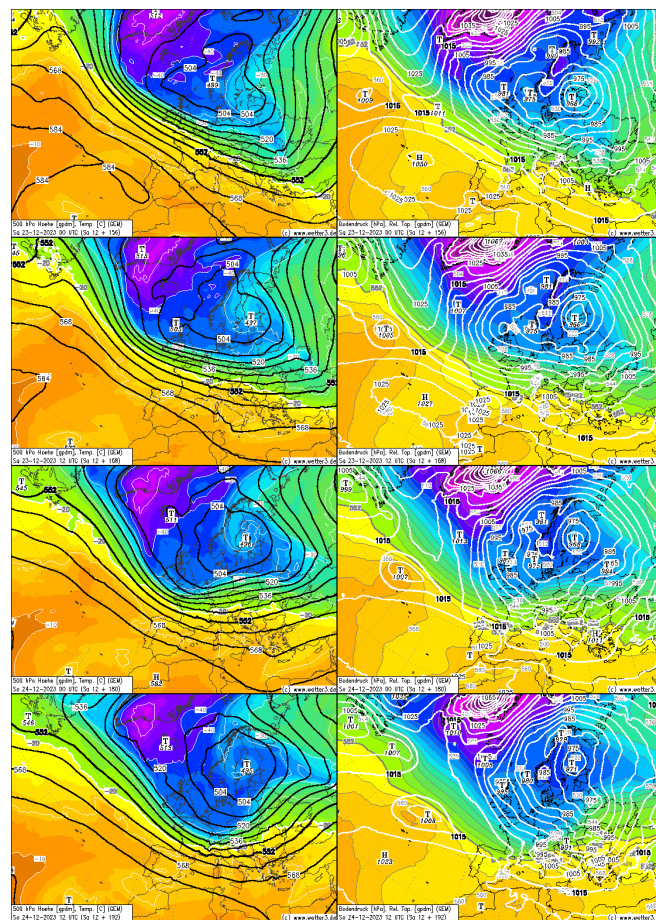
Rys. 61. Pole tendencji geopotencjału na godzinę 12 UTC, 22.12.2023 roku.



W piątek w południe centrum niżu dotrze do Zat. Fińskiej (WRF) lub nad Bałtyk (GEM). W kolejnych przebiegach modelu widać słabnące centrum izalobaryczne, co oznacza, że ujemna tendencja ciśnienia na dolnych mapach zacznie się zmniejszać i już w godzinach południowych będzie dodatnia. Zatem niż wejdzie w stadium wypełniania i głębokość wiru cyklonicznego zacznie się bardzo powoli zmniejszać, co oznaczać będzie wzrost ciśnienia. Ponadto układ niskiego ciśnienia będąc w fazie okludowania i zacznie również zwalniać w swoim ruchu.



Rys. 62. Pole tendencji ciśnienia na godzinę 12 UTC, 23.12.2023 roku.



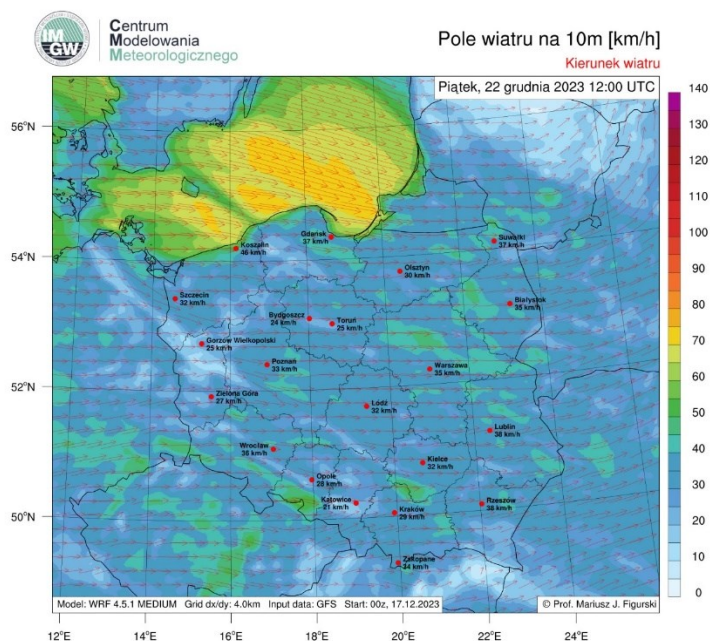
Rys. 63. Mapa topografii barycznej bezwzględnej TB500 wraz z polem temperatury na poziomie 500 hPa oraz pole ciśnienia naniesione na pole topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ .



Według prognoz numerycznych w niedzielę 24 grudnia 2023 roku ośrodek 971 hPa powinien przemieścić się nad Finlandię (model GEM).

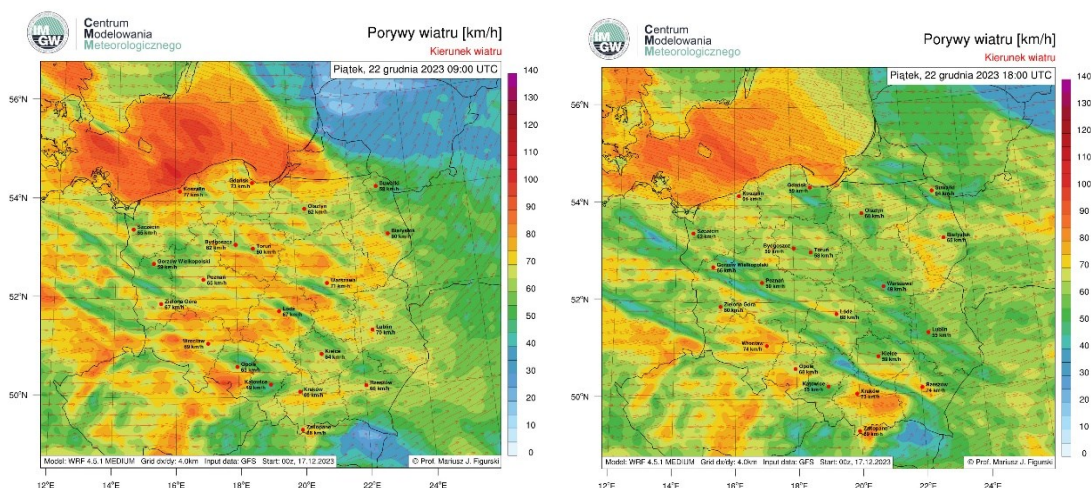
Nurkujący niż znad Islandii oraz wyż znad Atlantyku spowodował cyrkulację cyklonalną zachodnią w Europie i w Polsce.

Z symulacji przyziemnych pól meteorologicznych wynikało, że w okresie od piątku do niedzieli Polska pozostanie w obszarze wysokogradentowym. Należało spodziewać się znacznych prędkości wiatru.



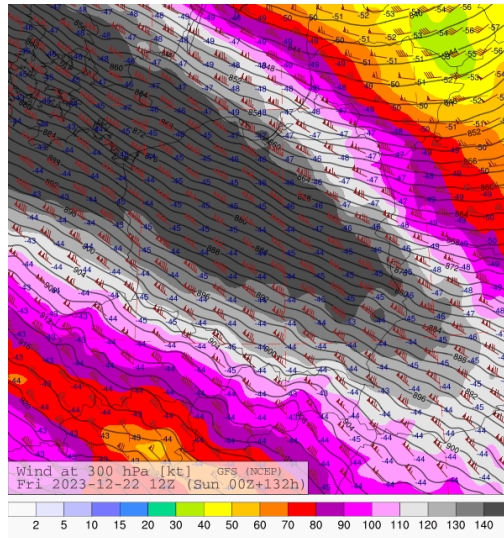
Rys. 64. Prognoza numeryczna pola wiatru na wysokości 10 metrów, 22.12.2023 roku, godzina 12 UTC.

W piątek prognozowany był zachodni kierunek wiatru, ze średnią prędkością wiatru 20-60 km/h.



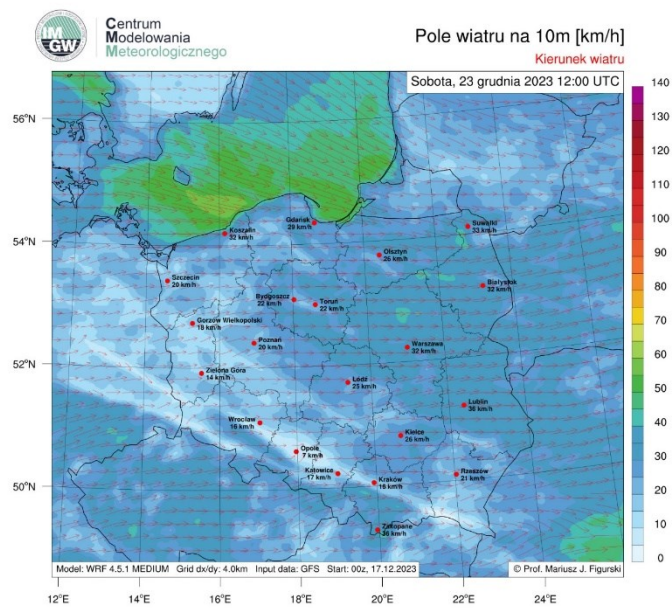
Rys. 65. Progностyczna symulacja pola porywów wiatru, 22.12.2023 roku.

W porywach prędkość wiatru powinna osiągać wartość 90-110 km/h. Na Bałtyku prognozowany sztorm.



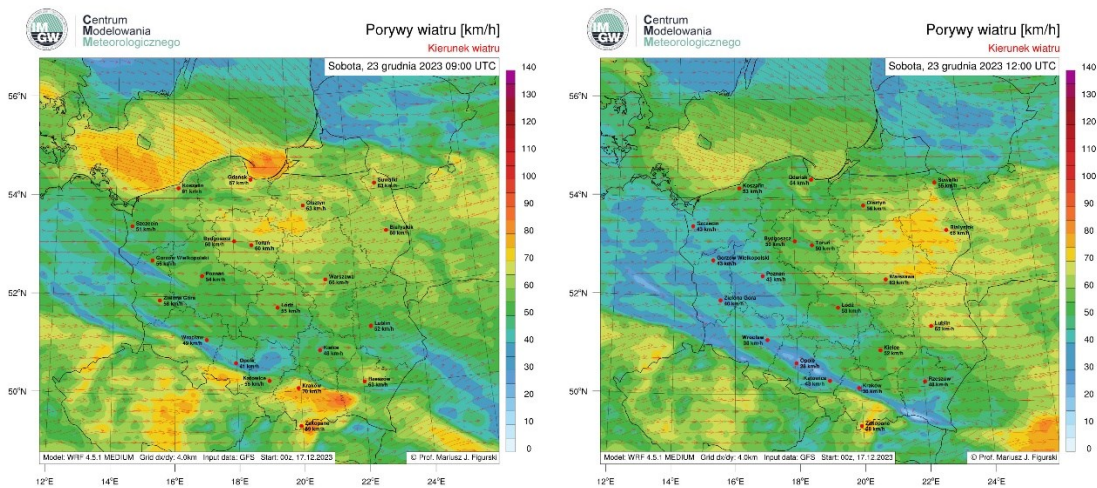
Rys. 66. Pole prędkości wiatru na poziomie TB300, godz. 12 UTC, 22.12. 2023 roku.

Z prognostycznego pola wiatru TB300 wynikało, że nad Polską będzie zalegał prąd strumieniowy. Na wysokości 9 km, oś prądu będzie przebiegała z NW na SE prędkość wiatru osiągać będzie prędkość 160 kt (80 m/s).



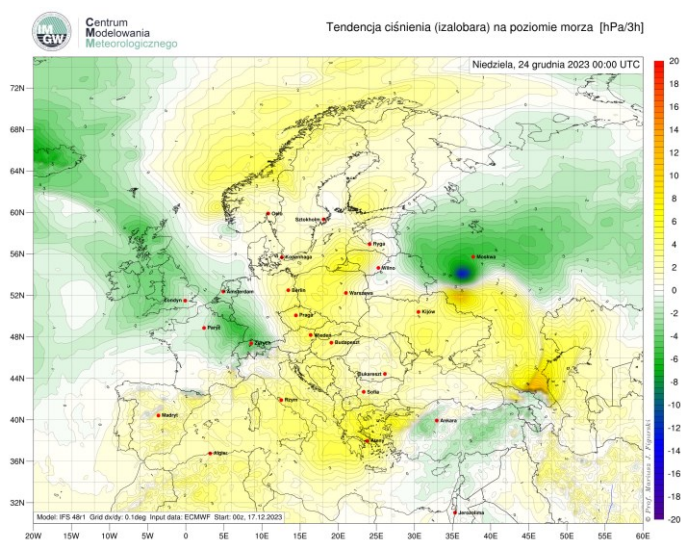
Rys. 67. Pole prędkości wiatru na wysokości 10 metrów, godz. 12 UTC, 23.12.2023 roku.





Rys. 68. Progностyczna symulacja pola porywów wiatru, 23.12.2023 roku.

W sobotę (23 XII 2023 roku) wiatr powinien być nadal zachodni i wiać z prędkością średnią 14-50 km/h. W porywach do 70 km/h i 100 km/h na południu kraju i nad Bałtykiem (w godzinach dopołudniowych) oraz porywy do 70 km/h na wschodzie kraju w godzinach południowych.



Rys. 69. Prognoza pola tendencji ciśnienia, godz. 00 UTC, 24.12.2023 roku.

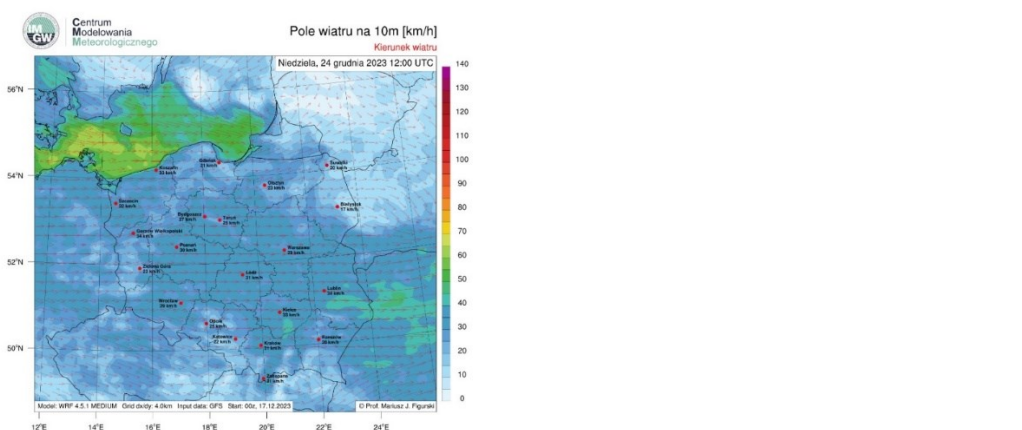
W nocy 23/24 grudnia 2023 roku nad Polską będzie występowała strefa dodatniej tendencji ciśnienia z centrum izalobarycznym dodatniej tendencji w rejonie obwodu królewieckiego.



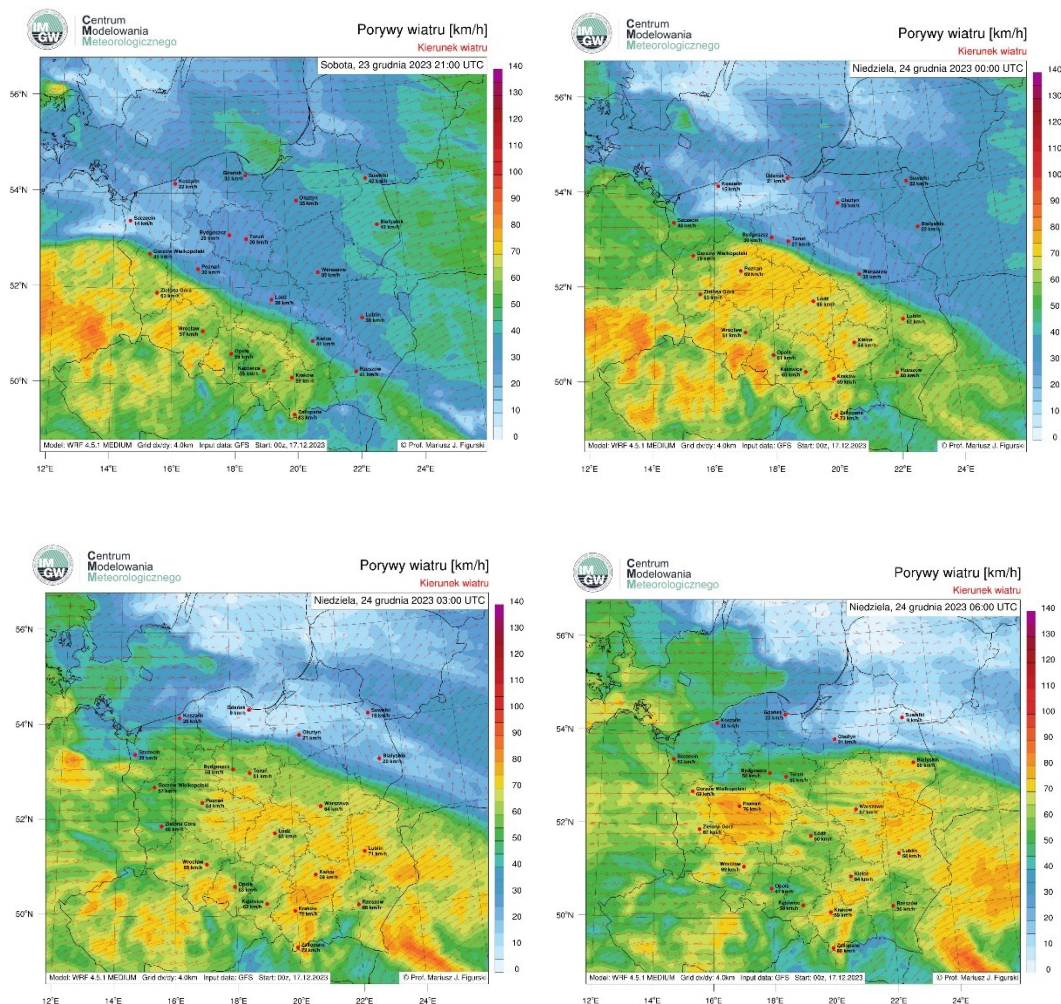
Rys. 70. Numeryczna prognoza pola ciśnienia, 24.12.2023 roku.

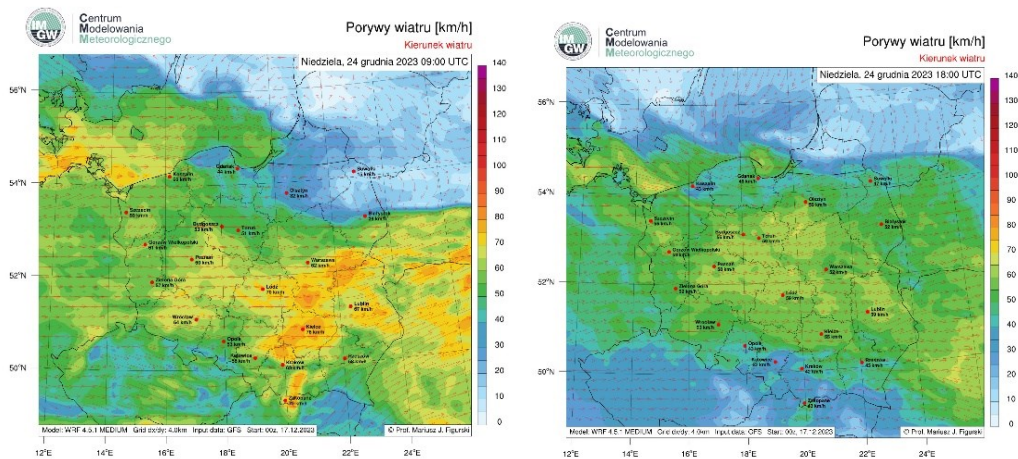


Z prognoz numerycznych wynikało, że powinien zwiększać horyzontalny gradient ciśnienia nad Polską.



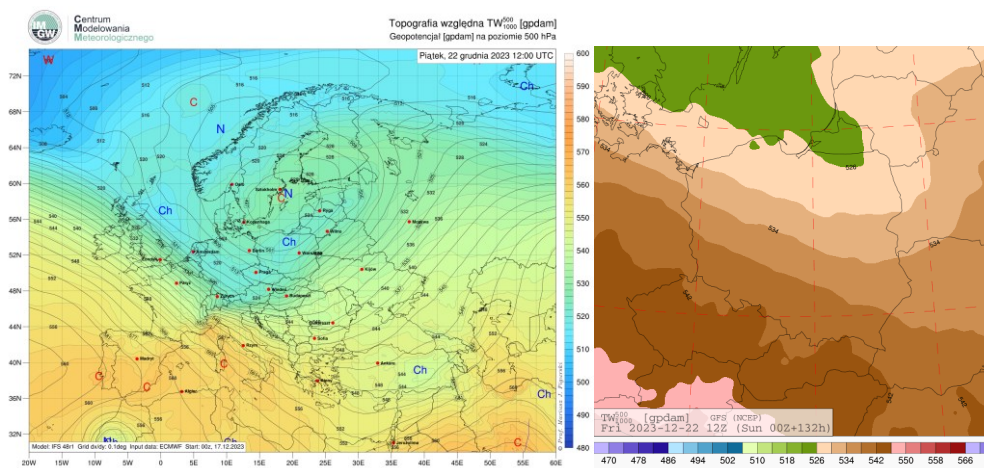
Rys. 71. Progностyczne pole prędkości wiatru na wysokości 10 metrów, godz. 12 UTC, 24.12.2023 roku.





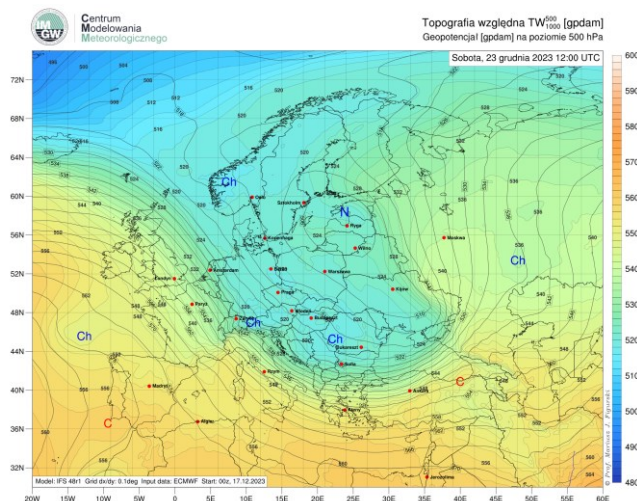
Rys. 72. Numeryczna prognoza porywów wiatru, 24.12.2023 roku.

W niedzielę 24 XII wiatr powinien wiać z zachodu, 20-45 km/h. Z soboty na niedzielę od zachodu zaznaczyć się powinna strefa zwiększonych porywów wiatru do 70-90 km/h. Strefa będzie przemieszczała się na wschód.

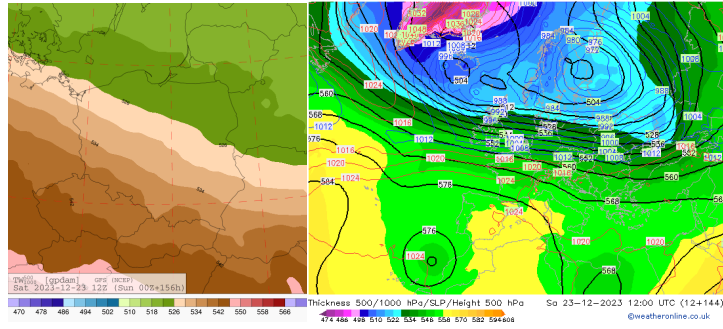


Rys. 73. Mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , godz. 12 UTC, 22.12.2023 roku.

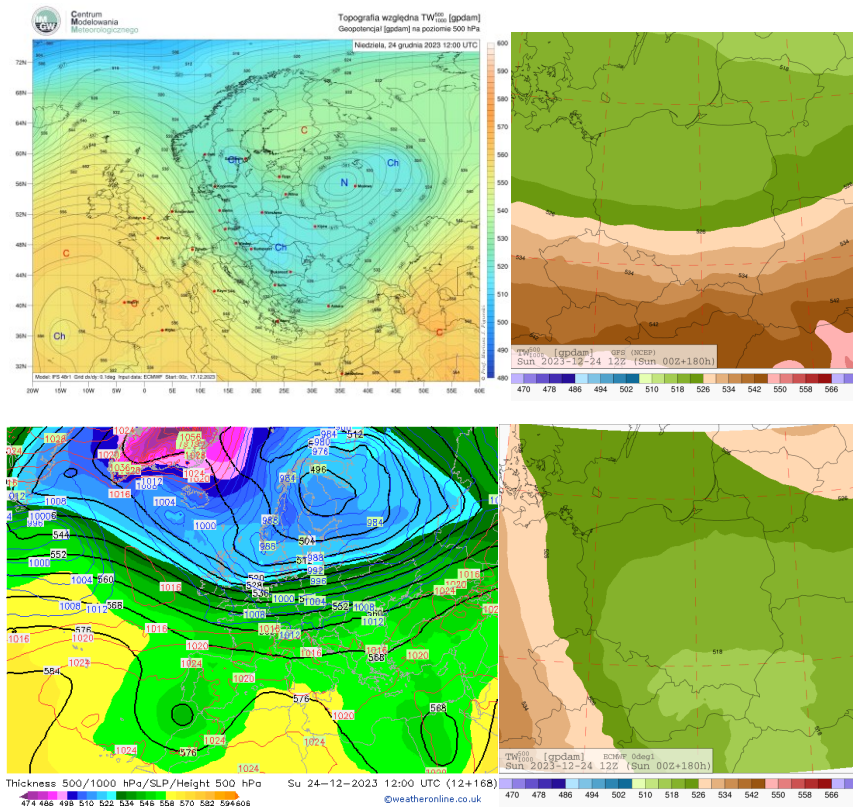
Na prognostycznych mapach  $TW_{1000}^{500}$  nad Polską zaznaczony był dodatni kąt adwekcji co oznaczało, że w piątek, 22 grudnia 2023 roku, Polska powinna być w zasięgu zatoki chłodu.







Rys. 74. Mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , godz. 12 UTC, 23.12.2023 roku.

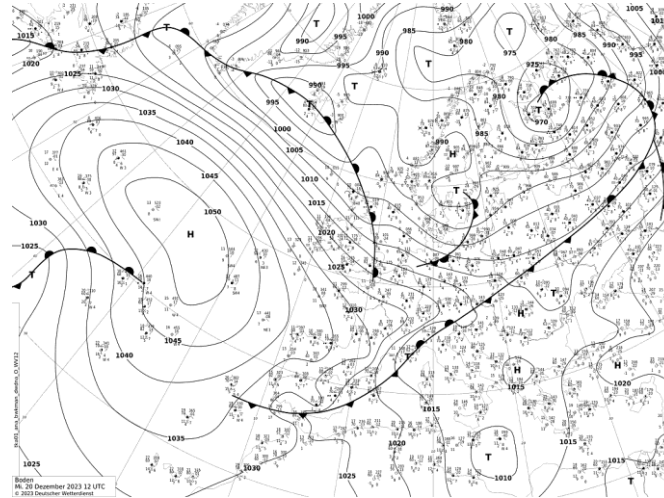


Rys. 75. Mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , godz. 12 UTC, 24.12.2023 roku.

W sobotę oraz w niedzielę Polska nadal powinna pozostać w zasięgu zatoki chłodu.

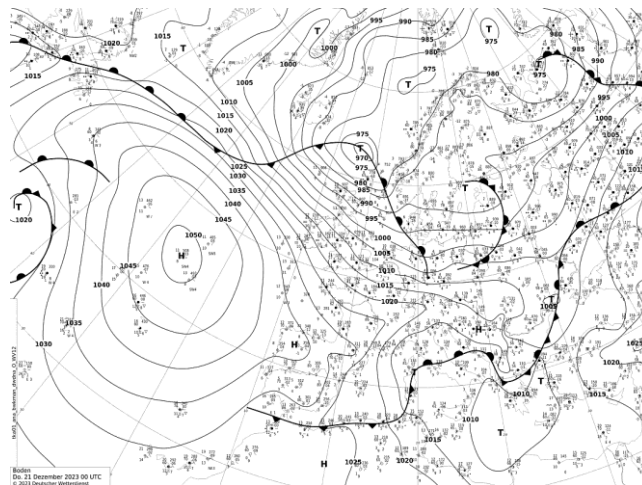


## Rzeczywista i progностyczna sytuacja synoptyczna w oparciu o symulacje numeryczne z dnia 21 XII 2023 roku.



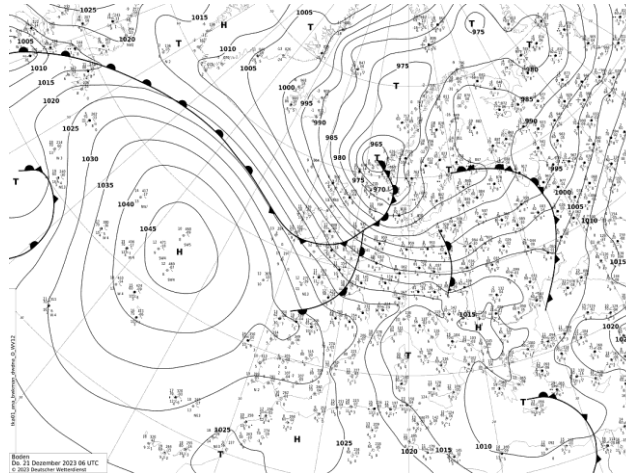
Rys. 76. Mapa synoptyczna z dnia 20.12.2023 roku, godz. 12 UTC. Źródło: [https://www1.wetter3.de/Archiv/archiv\\_dwd.html](https://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html)

Zgodnie z wcześniejszymi symulacjami wykonanymi 17 XII 2023 roku w rejonie Islandii doszło do zafalowania na froncie atmosferycznym i do cyklogenezy, co prawidłowo było prognozowane przez model numeryczny pogody. Wir cyklonalny zaczął bardzo szybko się pogłębiać i przemieszczał się w kierunku południowo wschodnim. Był to typowy niż „nurkujący”.



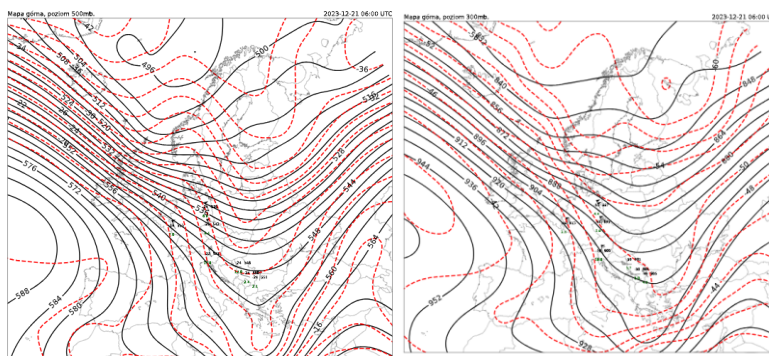
Rys. 77. Mapa synoptyczna z dnia 21.12.2023 roku, godz. 00 UTC. Źródło: [https://www1.wetter3.de/Archiv/archiv\\_dwd.html](https://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html)

W czwartek w nocy ośrodek 970 hPa dotarł w rejon Morza Norweskiego i był w stadium młodego cyklonu. Ciśnienie w centrum spadało, wzrastały horyzontalne gradienty ciśnienia. Gdy spojrzeć na fale na froncie to należy zauważyć, wzrastające falowe wygięcie frontu. Zaostrzał się ciepły wycinek ograniczony z przodu frontem ciepłym i frontem chłodnym w tylnej części. Wzrastała liczba zamkniętych izobar.



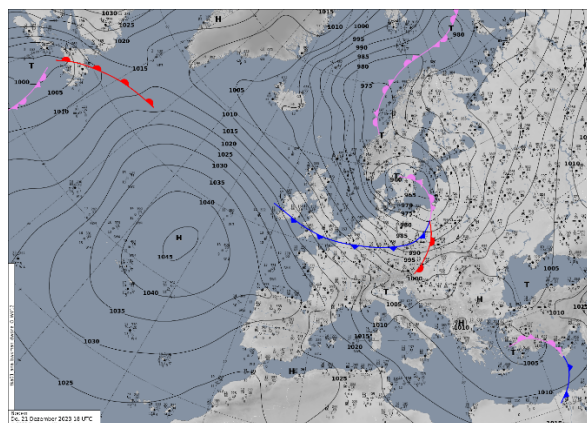
Rys. 78. Mapa synoptyczna z dnia 21.12.2023 roku, godz. 06 UTC. Źródło: [https://www1.wetter3.de/Archiv/archiv\\_dwd.html](https://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html)

Front chłodny szybko zbliżał się do frontu ciepłego i w końcu doszło do zwarcia obu powierzchni frontowych rozpoczynając fazę okludowania się niżej. O godzinie 06 UTC, 21 XII 2023 roku, w centrum ciśnienie wynosiło 965 hPa. W dobrze wyrażonej zatoce zalegał front okluzji. Pomimo, że wir cykloniczny wszedł w fazę okludowania nie osiągnął jeszcze maksymalnej głębokości. Niżej nadal się pogłębiał, ale tempo spadku ciśnienia przebiegało wolniej.



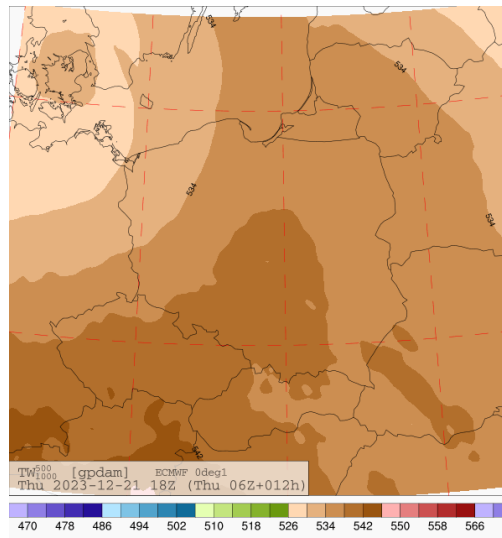
Rys. 79. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB500, TB300, godz. 06 UTC, 21.12.2023 roku.

W górnym polu ciśnienia nad dolnym ośrodkiem barycznym, w przedniej części słabo wygięte izohipsy w kształcie klina, co wskazywało na zaleganie z przodu dolnego ośrodka górnego słabego klina, natomiast w tylnej części dolnego układu izohipsy słabo wygięte na kształt zatoki, co oznacza zaleganie słabej górnej zatoki.



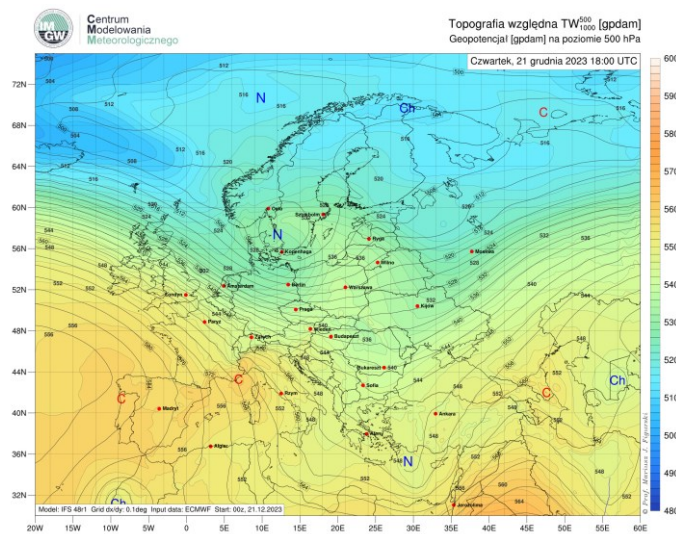
Rys. 80. Mapa synoptyczna, godz. 18 UTC, 21.12.2023 roku.

O godzinie 18 UTC, 21 XII 2023 roku, centrum wiru przemieściło się już nad południową Skandynawię, a ciśnienie w centrum osiągnęło wartość 960 hPa. Punkt okluzji zalegał już nad Polską i przemieszczał się na wschód. Ciepły wycinek niżu z ciepłym powietrzem zalegał nad Polską południową i centralną, co widać na mapie topografii barycznej względnej.



Rys. 81. Mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , godz. 18 UTC, 21.12.2023 roku.

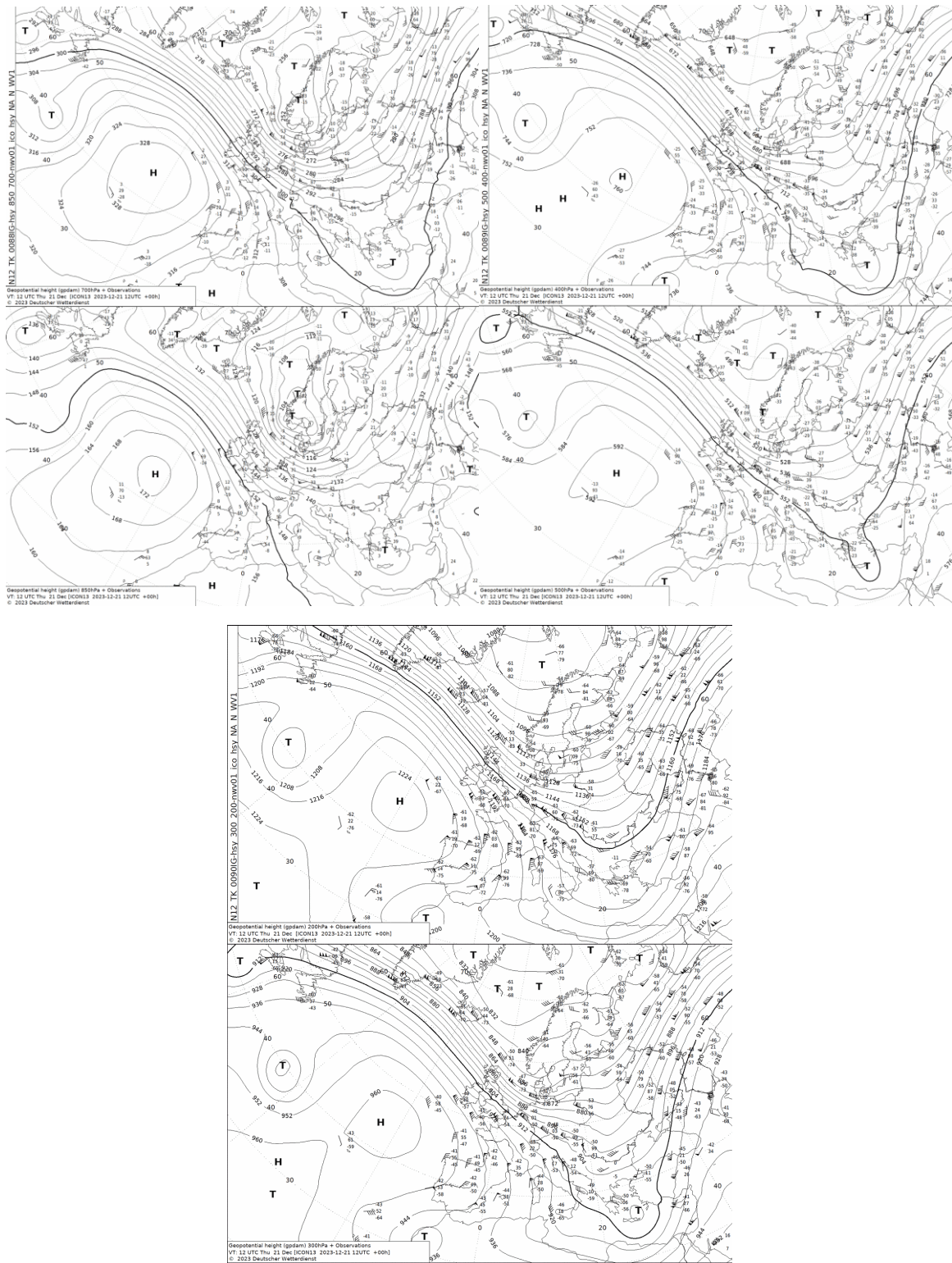
Z symulacji numerycznych wynikało, że oś klina ciepła przebiegać będzie nad Polską południową i centralną.



Rys. 82. Mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , godz. 18 UTC, 21.12.2023 roku.

Progностyczne izohipsy względne wygięte falowo wskazujące na zaostrenie się ciepłego wycinka niżu.

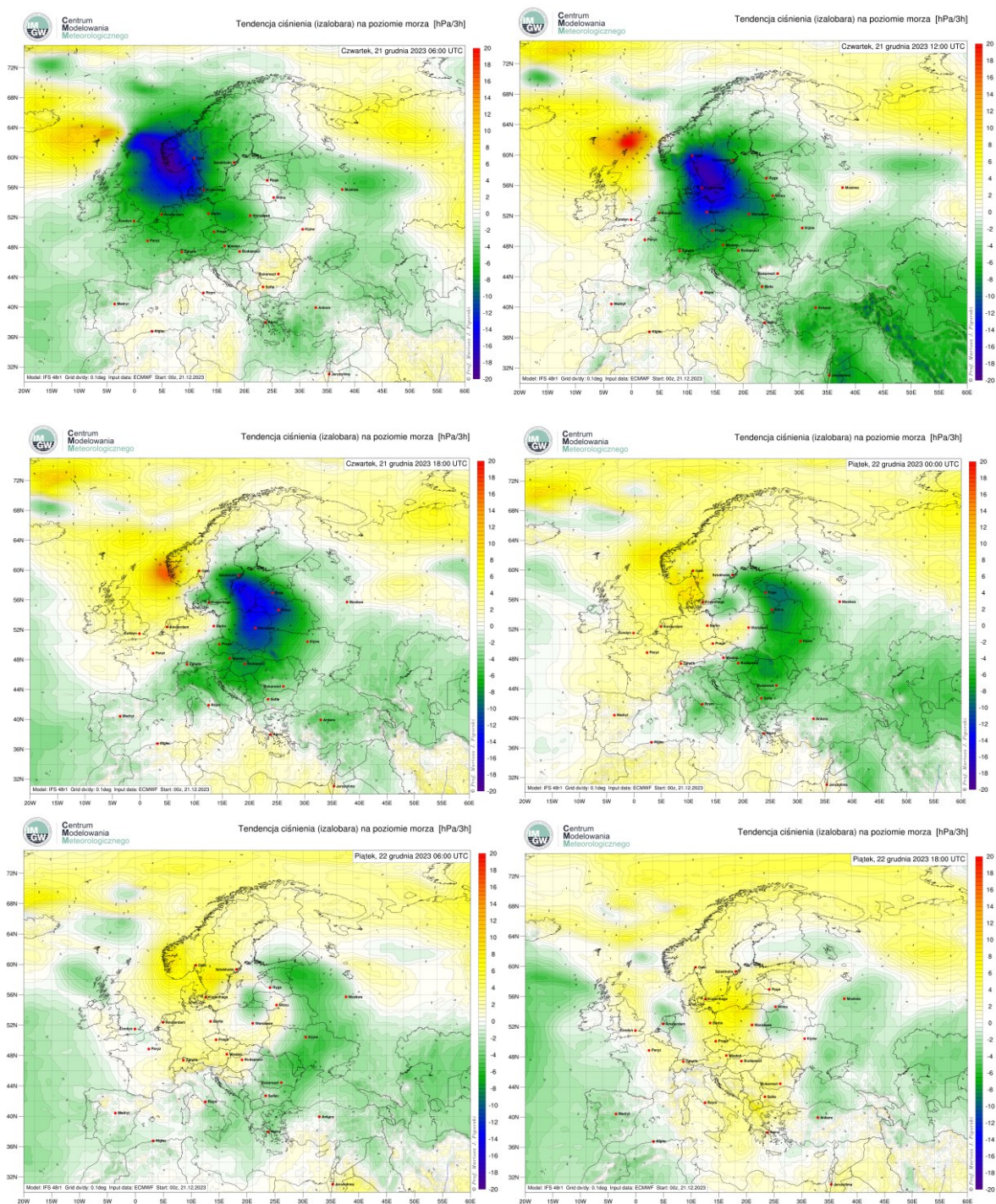




Rys. 83. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB850, TB700, TB500, TB300, godz. 12 UTC, 21.12.2023 roku.

Na godzinę 12 UTC, 21 XII 2023 roku, analizowany niż był układem, który rozbudował się do wysokości 700 hPa. Na wysokości 850 hPa głębokość wiru cyklonicznego wynosiła 104 gdam, a na wysokości 700 hPa głębokość wiru wynosiła 252 gdam. Na wysokości 700 hPa dobrze wyrażona zamknięta cyrkulacja cykloniczna. Wyżej izohipsy szybko prostowały się i były gięte na kształt zatoki. Obszar zagęszczonych izohips bezwzględnych przesunięty bardziej na południe w obszar cieplejszych mas powietrza.





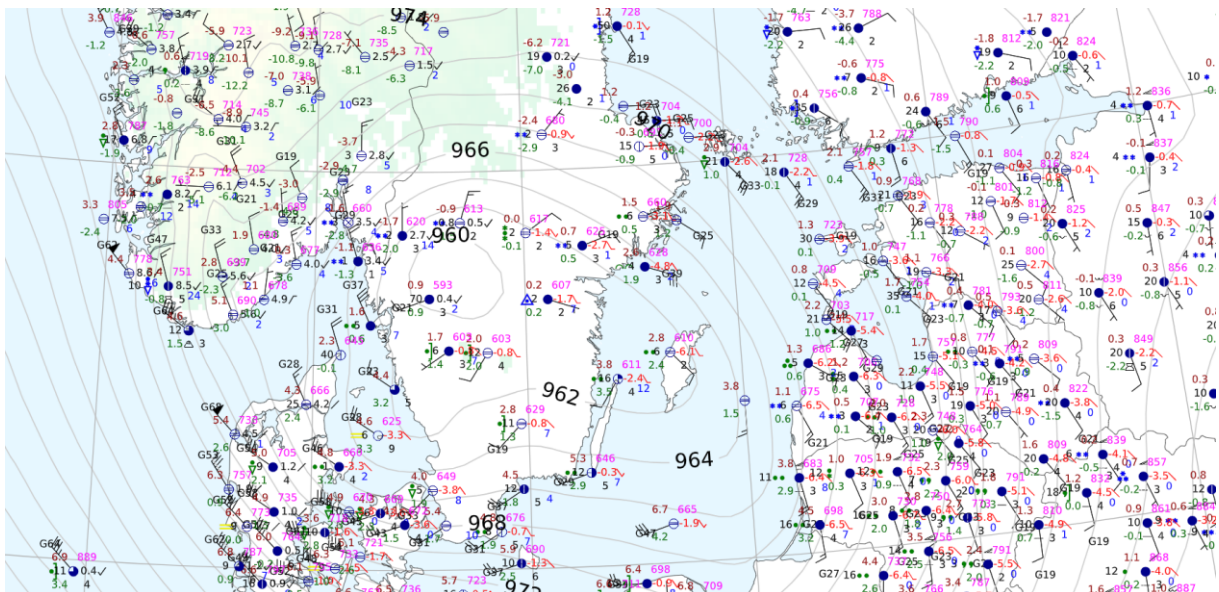
Rys. 84. Prognoza numeryczna pola tendencji ciśnienia na 21 i 22.12.2023 roku.

Na dolnych prognostycznych mapach tendencji ciśnienia widać przemieszczający się obszar (koloru niebieskiego) ujemnych tendencji ciśnienia. Początkowo w centrum izalobarycznym tendencja ciśnienia wynosiła -20 hPa /3 godziny. Tak duży spadek ciśnienia skutkował wystąpieniem silnych wiatrów. W kolejnych przebiegach modelu tendencja ciśnienia zaczęły się zmniejszać. O godzinie 18 UTC (21 XII 2023 roku) prognostyczna tendencja wynosiła już -17 hPa/3 godziny, co wskazuje, że niż powoli zaczyna osiągać maksimum głębokości.



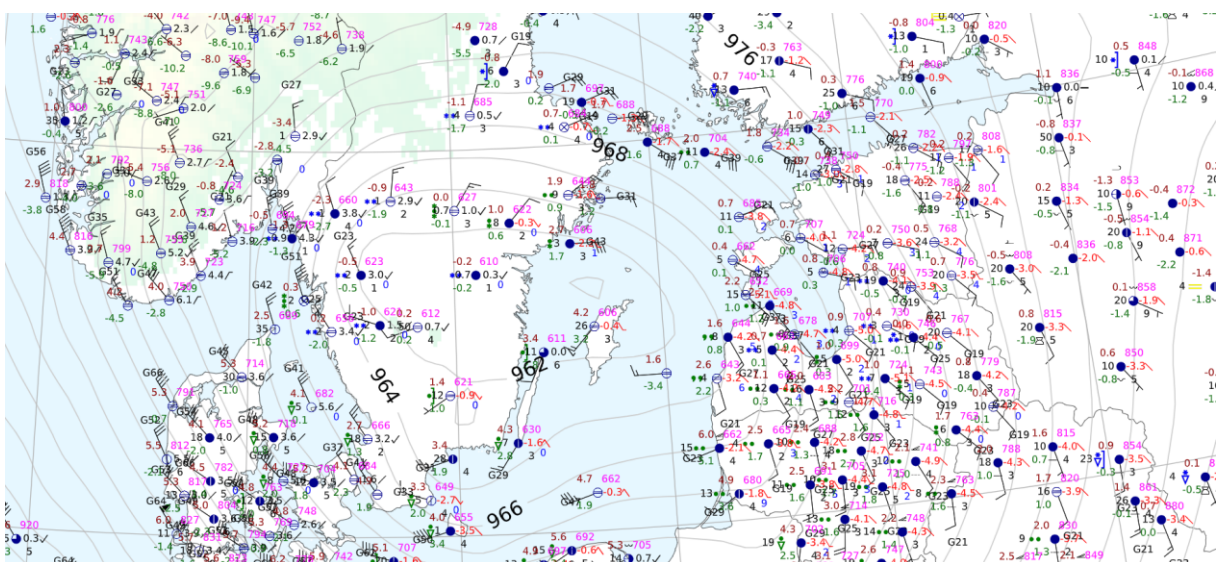






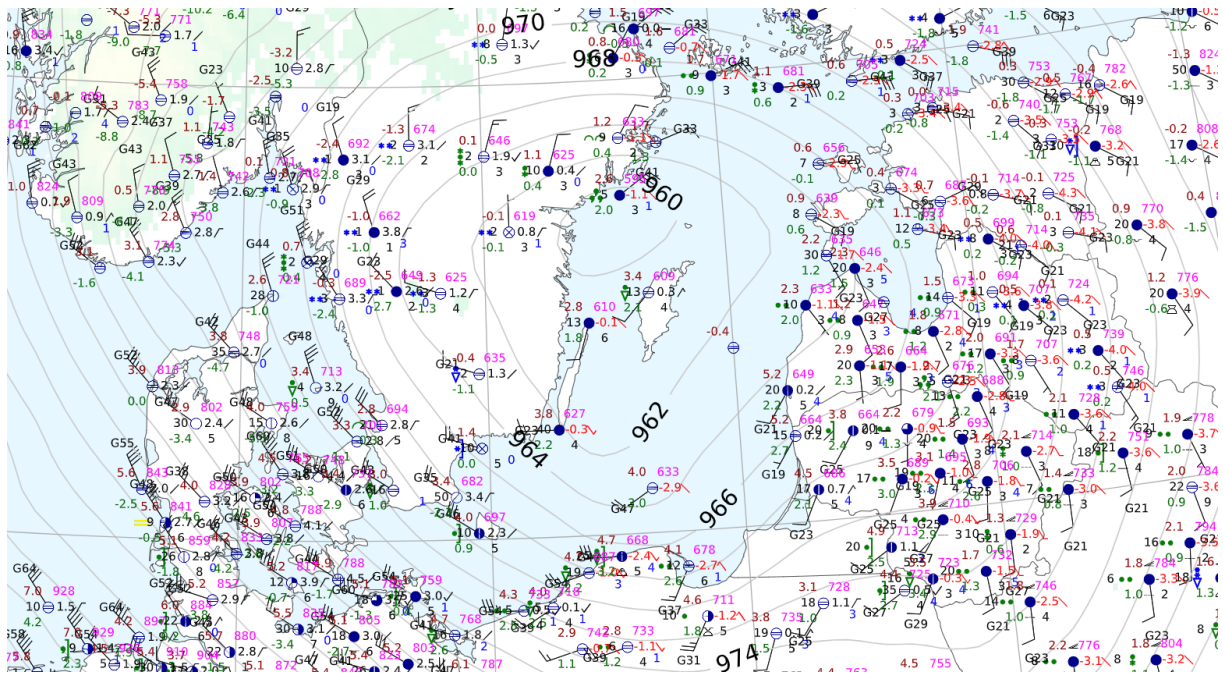
Rys. 86. Fragment mapy synoptycznej z 21.12.2023, 18 UTC.

W czwartek 21 grudnia 2023 roku, o godzinie 18 UTC, ciśnienie w centrum wiru cyklonycznego wynosiło 959,3 hPa (pomiar z najbliższej stacji) i znajdowało się nad południową Szwecją.



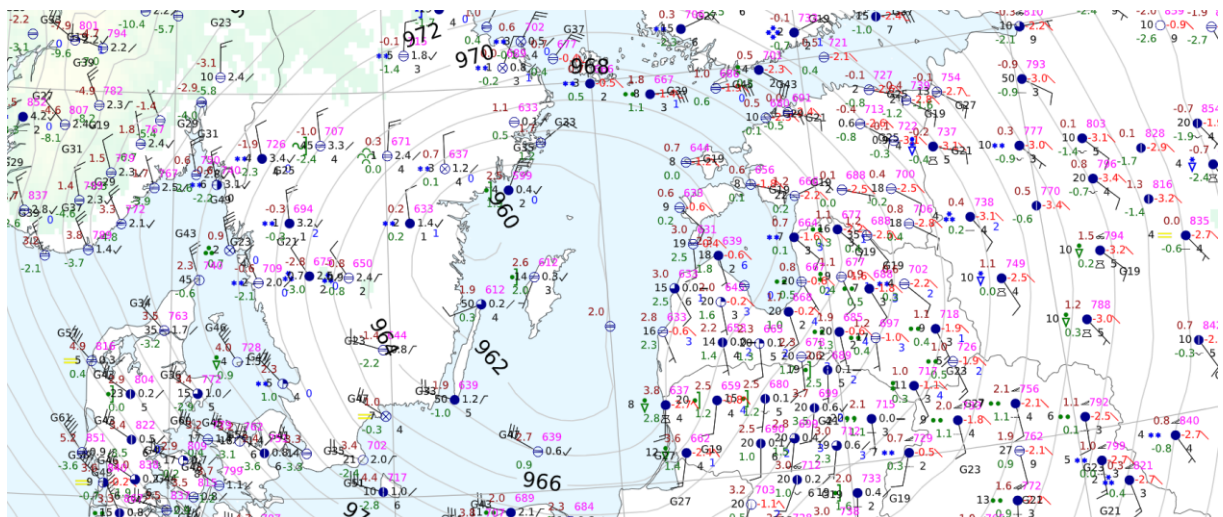
Rys. 87. Fragment mapy synoptycznej z 21.12.2023, 21 UTC.

Następnie ośrodek niżu przemieścił się nad Gotlandię. Ciśnienie w centrum wynosiło już 960,6 hPa (należy podkreślić, że stacja niekoniecznie musiała znaleźć się w centrum układu barycznego, jest to najniższy pomiar ciśnienia zanotowany w obrębie cyklonu).



Rys. 88. Fragment mapy synoptycznej z 22.12.2023, 00 UTC.

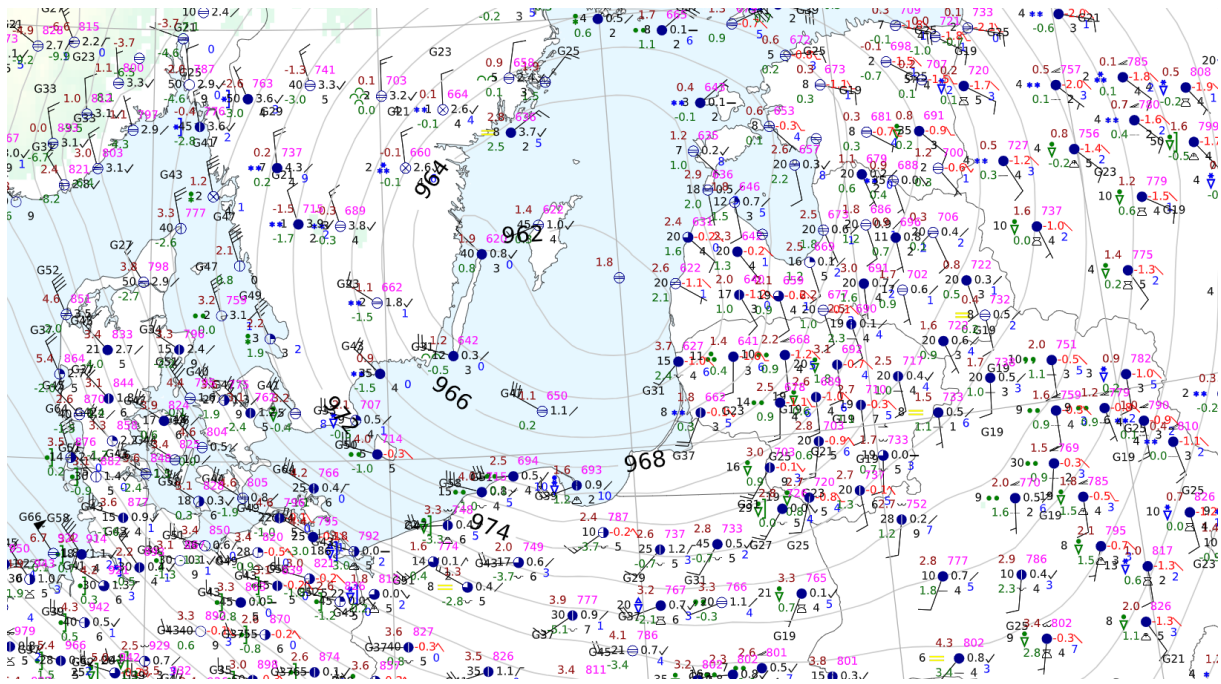
Następnie ośrodek przemieścił się na północ, a ciśnienia w rejonie centrum wynosiło 959 hPa.



Rys. 89. Fragment mapy synoptycznej z 22.12.2023, 03 UTC.

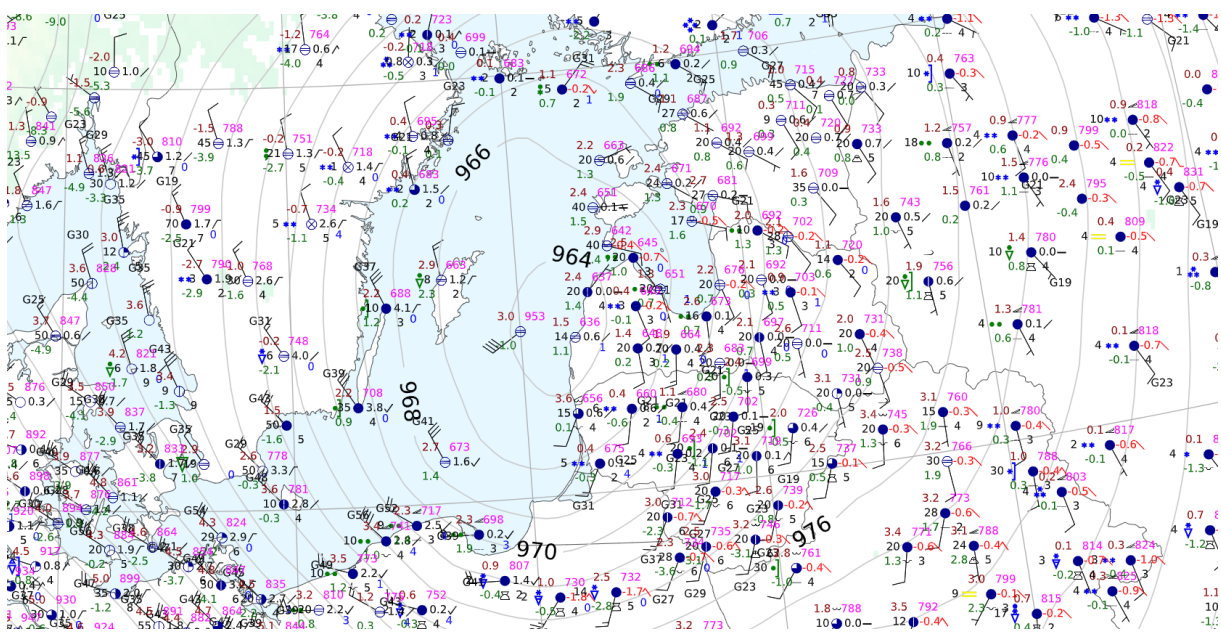
W ciągu następnych trzech godzin ciśnienie w ośrodku nie uległo zmianie i wynosiło 959,9 hPa.





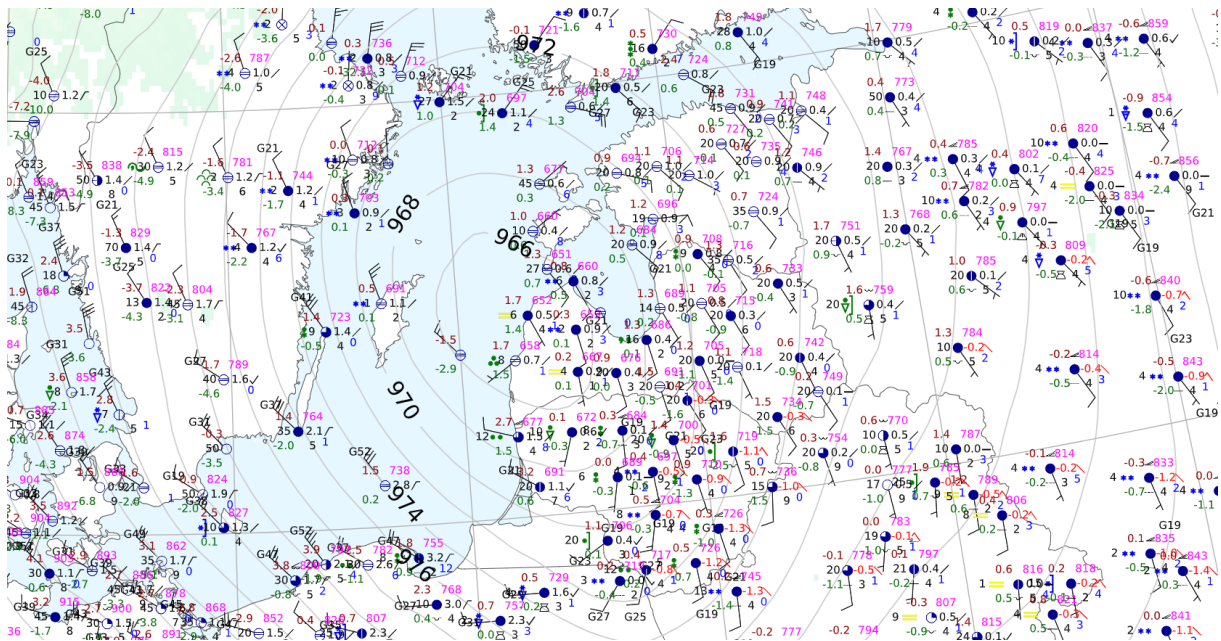
Rys. 90. Fragment mapy synoptycznej z 22.12.2023, 06 UTC.

Następnie ośrodek przemieści się w rejon Gotlandii i ciśnienia na zachód od Gotlandii wynosiło 962 hPa.



Rys. 91. Fragment mapy synoptycznej z 22.12.2023, 12 UTC.

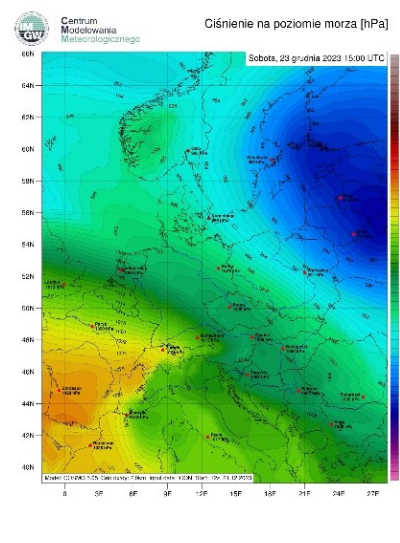
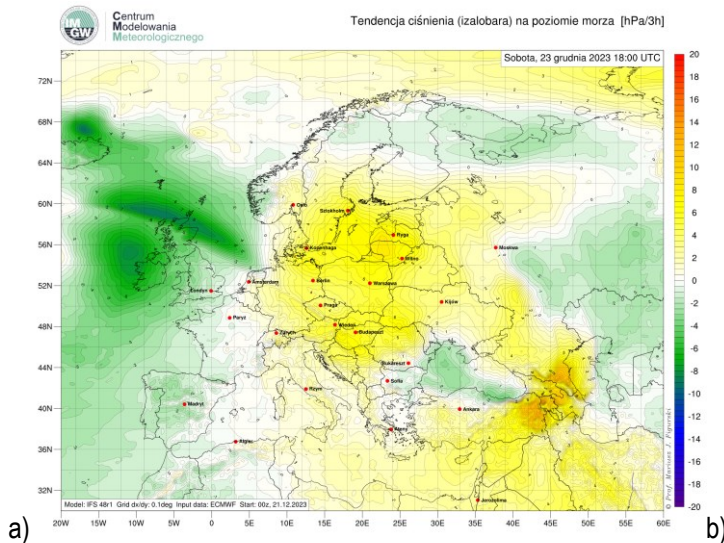




Rys. 92. Fragment mapy synoptycznej z 22.12.2023, 18 UTC.

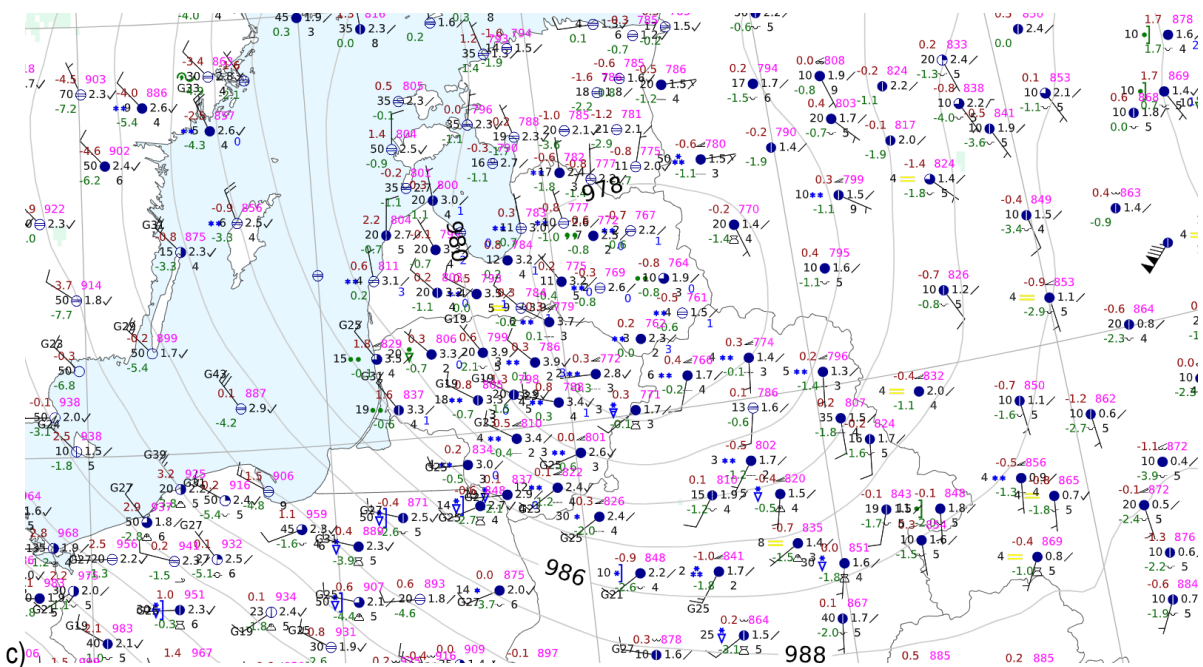
Na kolejnych mapach synoptycznych wyraźnie widać wzrost ciśnienia. Zatem niż wszedł w fazę wypełniania w piątek między godziną 03 UTC a 06 UTC. Rzeczywista faza wypełniania rozpoczęła się zatem wcześniej niż wynikało to z prognoz numerycznych.

W piątek nadal występował duży horizontalny gradient ciśnienia co wskazywało na występowanie dużych prędkości wiatru.



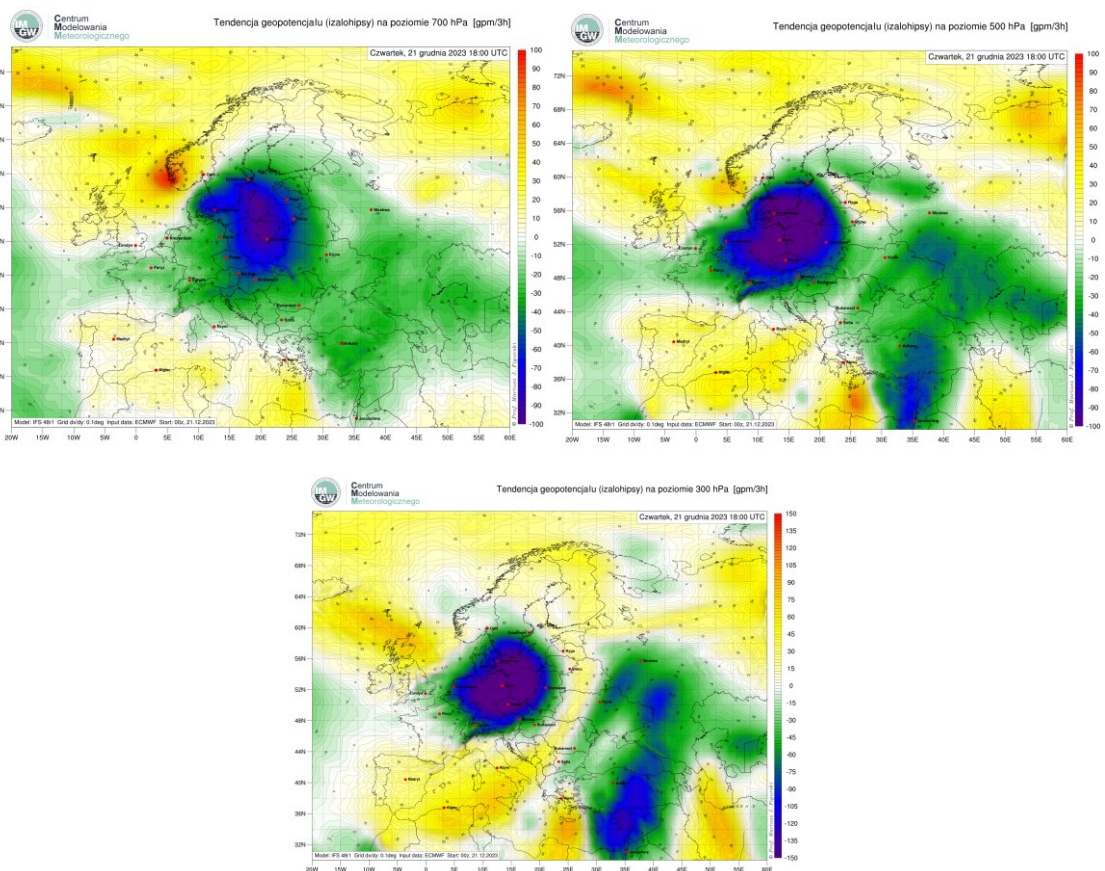
a)

b)



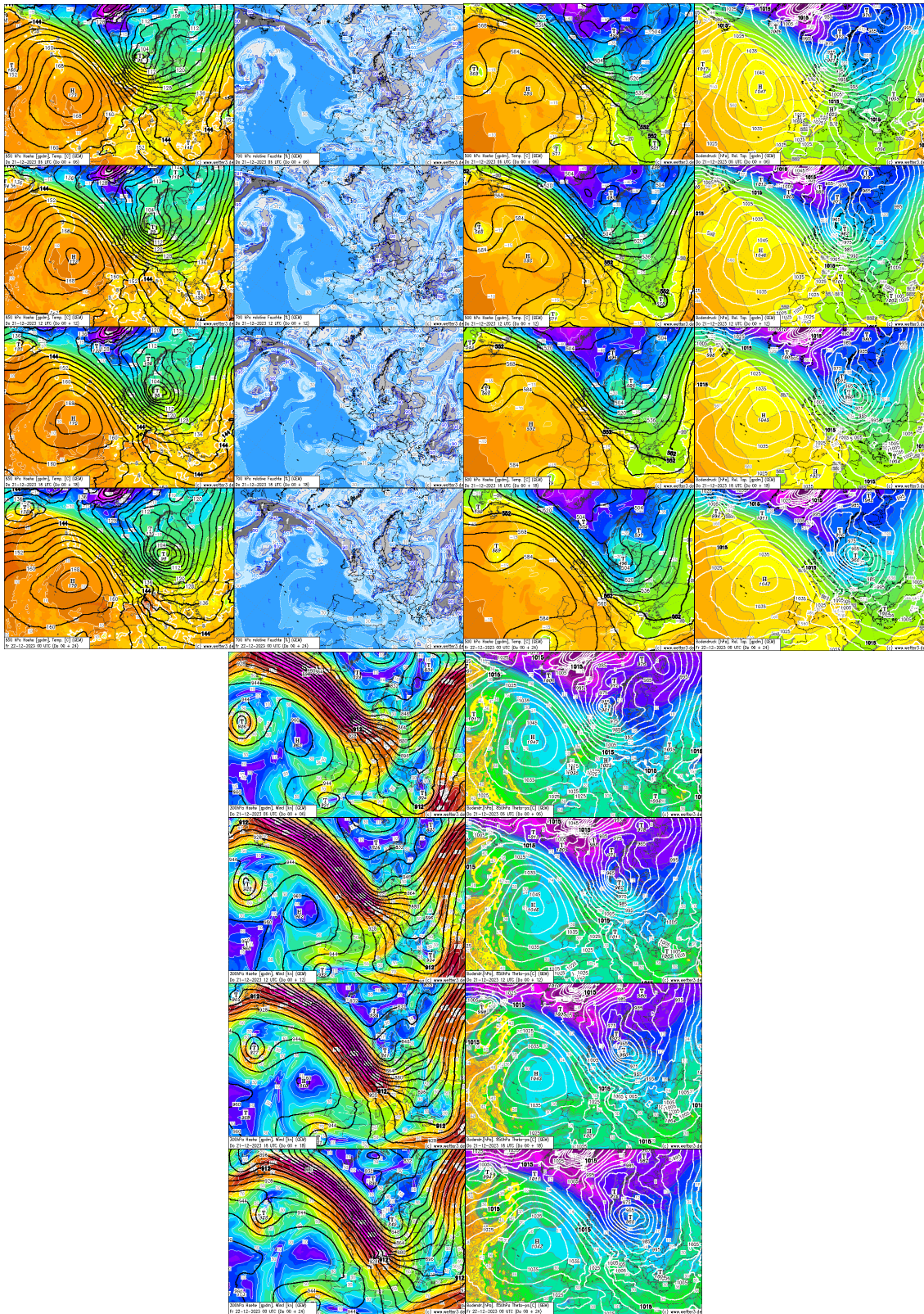
Rys. 93. Numeryczna prognoza tendencji ciśnienia na poziomie morza (a), prognoza pola ciśnienia (b), fragment mapy synoptycznej z 23.12.2023 roku, godzina 15 UTC (c).

W sobotę w Europie środkowej, częściowo nad Bałtykiem i Szwecją, nad południową Finlandią oraz Europą wschodnią prognozowana była dodatnia tendencja ciśnienia, co sugerowało postępujący proces wypełniania nizu, co potwierdza symulacja pola ciśnienia (model COSMO) oraz potwierdziły to rzeczywiste pomiary naniesiona na mapę konturową Europy.



Rys. 94. Numeryczna prognoza pola tendencji geopotencjału na poziomie TB700, TB500 oraz TB300 na 21.12.2023 roku, godzina 18 UTC.



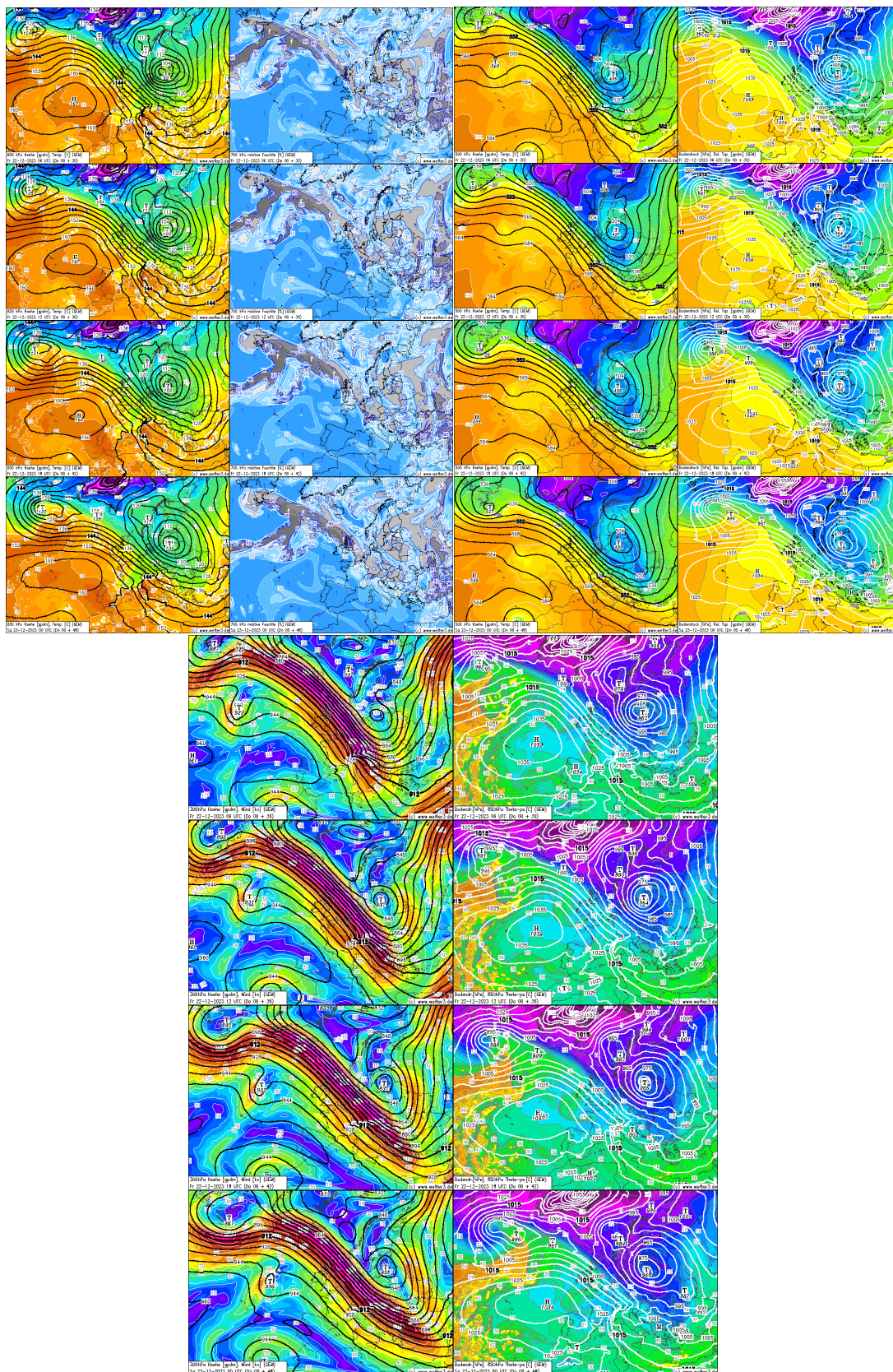


Rys. 95. Prognoza pola geopotencjału na poziomach TB850, TB500, TB300, pola wilgotności na poziomie TB700, pola ciśnienia na poziomie morza, obejmująca okres od godziny 06 UTC 21.12.2023 roku do godziny 00 UTC 22.12.2023 roku.

W czwartek wieczorem, z symulacji numerycznych tendencji barycznej z poziomu 700 hPa, 500 hPa oraz 300 hPa wynikało, że na ww. poziomach proces pogłębiania ośrodka cyklonicznego będzie przebiegał w dalszym ciągu, co potwierdzają symulacje numeryczne pola geopotencjału na poziomach TB850, TB500, TB300. Z



symulacji pola wilgotności TB700 wynikało, że nad Polską zalega spora ilość wilgotności zatem należało spodziewać się opadów atmosferycznych.

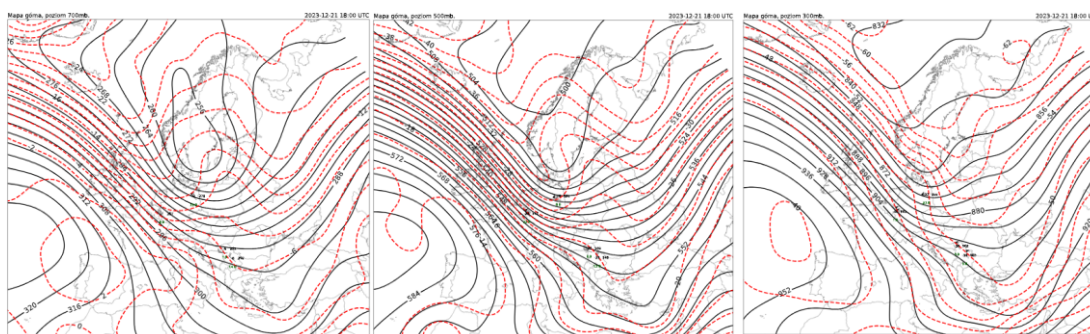


Rys. 96. Prognoza pola geopotencjału na poziomach TB850, TB500, TB300, pola wilgotności na poziomie TB700, pola ciśnienia na poziomie morza, obejmująca okres od godziny 06 UTC 22.12.2023 roku do godziny 00 UTC 23.12.2023 roku.



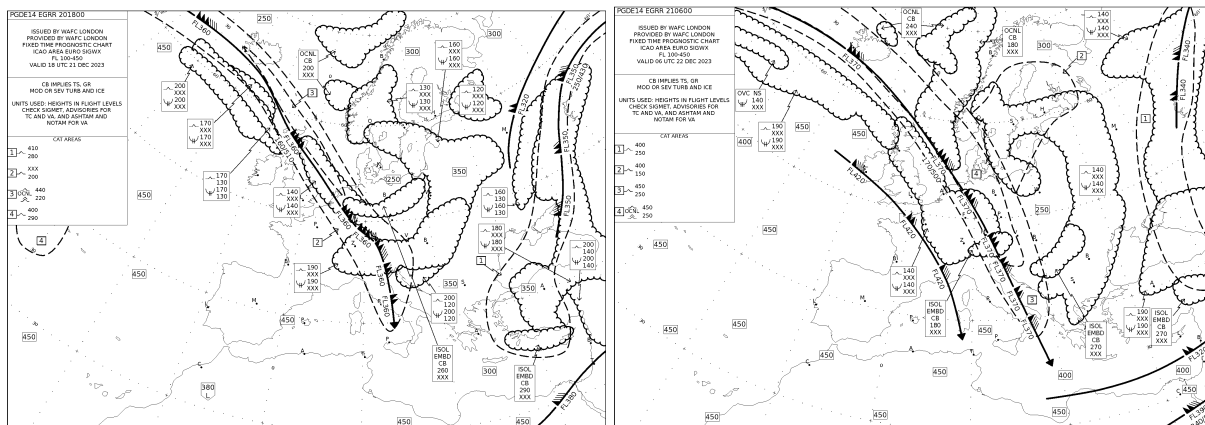
Prognoza pola ciśnienia w oparciu o symulację numeryczną modelem GEM wskazywała, że niż powinien wejść w fazę wypełniania w piątek 22 XII 2023 roku, między godziną 00 UTC a 06 UTC, co idealnie potwierdziło się z rzeczywistością. Także poprawnie została zaprognozowana wartość ciśnienia w centrum ośrodka barycznym. Z symulacji numerycznych pola barycznego na poziomach 850 hPa, 500 hPa i 300 hPa wynikało, że wir będzie się rozbudowywał ku górze stając się ostatecznie wysokim układem barycznym. Proces wypełniania również szybko postępować będzie ku górze.

Na poziomie 500 hPa i 700 hPa izotermi gięte były na kształt klina co potwierdzały prognostyczne mapy topografii barycznej względnej TW. Na wysokości 300 hPa izotermi były już gięte na kształt zatoki chłodu.



Rys. 97. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB700, TB500, TB300, 21.12.2023 roku, godzina 18 UTC.

Nad Atlantykiem, nad Europą zachodnią występowało duże zagęszczenie izohips oraz izoterm na poziomach 700 hPa, 500 hPa oraz 300 hPa. Zatem należał spodziewać się w ww. rejonach prądu strumieniowego. Z analizy significantu europejskiego wynikało, że na godzinę 18 UTC (21 XII 2023 roku) prognozowany był prąd strumieniowy na wysokości FL360, z maksymalną prędkością w osi prądu od 100 kt do 200 kt, czyli od 50 m/s do 100 m/s.

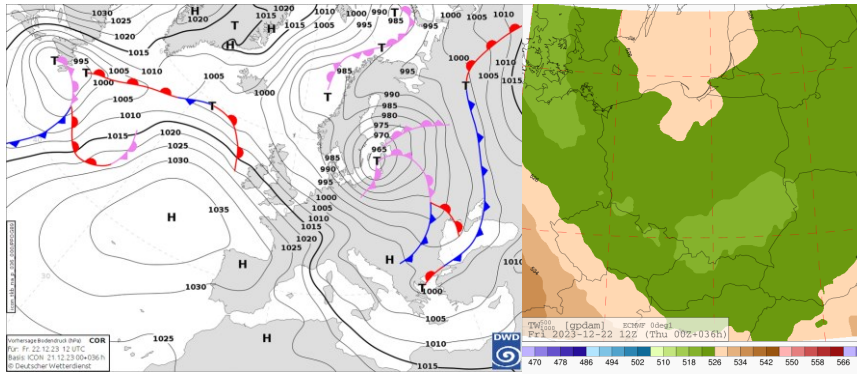


Rys. 98. Significant europejski na godz. 18 UTC, 21 grudnia 2023 roku (lewy) oraz na godz. 06 UTC, 22.12.2023 roku (prawy), źródło: [www.awiacja.imgw.pl](http://www.awiacja.imgw.pl).

Z prognozy wynikało, że w piątek o godzinie 06 UTC, 22 XII 2023 roku, czyli w dniu przesilenia zimowego, kiedy to Słońce osiągnęło stanowisko zimowe, oś prądu strumieniowego powinna się nieco podnieść do poziomu FL370, a prędkość wiatru w osi prądu osiągać powinny wartość od 90 kt (45 m/s) do 190 kt (95 m/s). Również tropopauza powinna zalegać dość nisko nad Polską, na wysokości FL250.

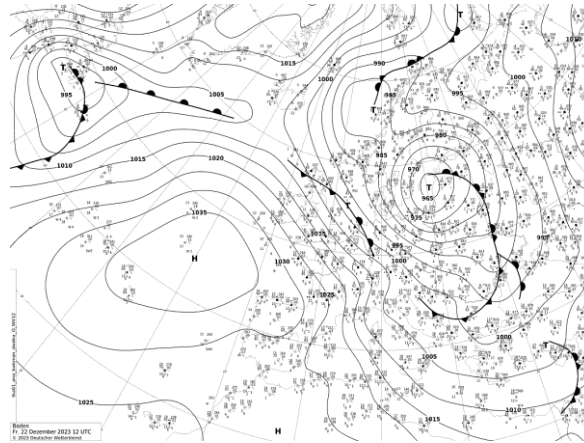
## Progностyczna sytuacja synoptyczna w oparciu o model ICON

Piątek, 22 XII 2023 roku



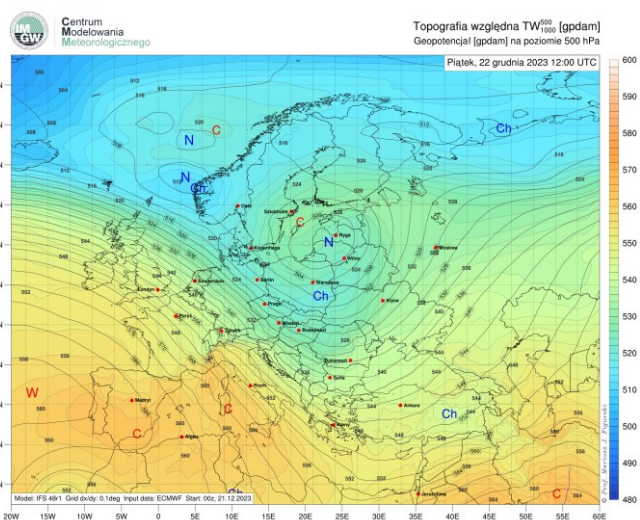
Rys. 99. Progностyczna mapa synoptyczna na godz. 12 UTC, 22.12.2023 roku (lewy), progностyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$  na godz. 12 UTC, 22 XII 2023 roku.

W piątek pogodę w Polsce nadal kształtował głęboki niż, co było zgodne z progностyczną mapą synoptyczną.



Rys. 100. Mapa synoptyczna, godz. 12 UTC, 22.12.2023 roku.

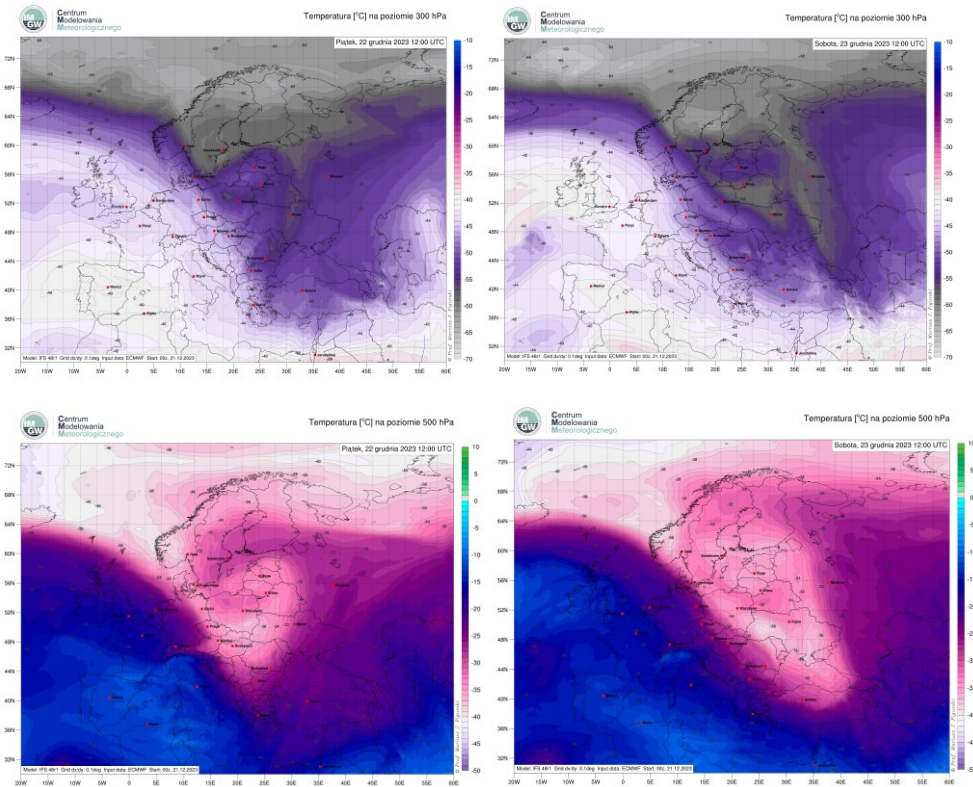
Rzeczywiste położenie frontu co do zasady było zgodne z progностycznym rozkładem zatok, w których zalegały powierzchnie frontowe, z tą różnicą, że z zaprogностowanego rozkładu frontów atmosferycznych wynikało występowanie frontu oklucji w północnych rejonach kraju, czego nie stwierdzono w rzeczywistości.



Rys. 101. Mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , godz. 12 UTC, 22.12.2023 roku.



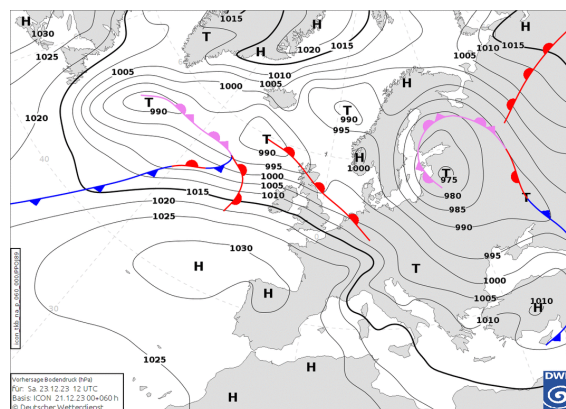
Z symulacji pola geopotencjału względnego na 22 XII 2023 roku, godzina 12 UTC, nad Polską centralną i wschodnią występować powinien dodatni kąt adwekcji co wskazywało na adwekcję chłodu. Nad Polską zachodnią prognozowany był ujemny kąt adwekcji, a zatem w tym rejonie nastąpić powinna adwekcja ciepła. Według symulacji modelem ECMWF nad południowo wschodnią Polską zalegać powinien ośrodek chłodu. Jednak nadal kraj pozostawał w zasięgu powietrza polarno-morskiego. Należy również podkreślić, że w tej fazie rozwoju niżu front atmosferyczny przemieści się bardziej na krańce układu zatem także i adwekcyjne zmiany temperatury także przemieszczą się na krańce układu.



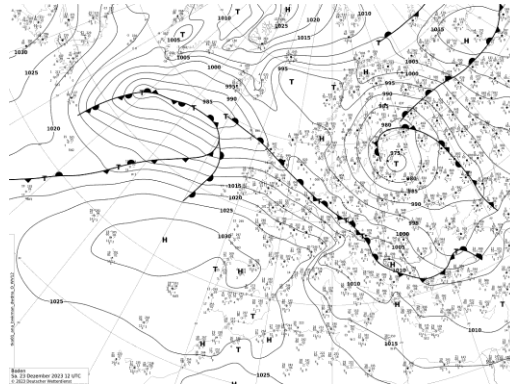
Rys. 102. Prognostyczne pole temperatury na poziomie 500 hPa oraz 300 hPa, na godz. 12 UTC 22 i 23.12.2023 roku.

Powyższą analizę potwierdzały symulacje pola temperatury na poziomie 500 hPa oraz 300 hPa.

### **Sobota, 23 XII 2023 roku**

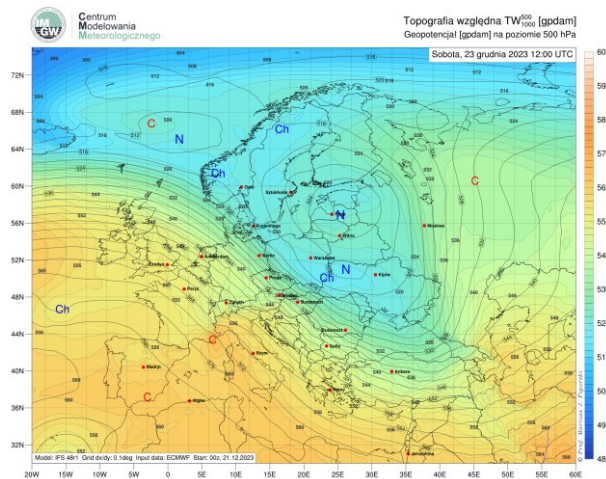


Rys. 103. Prognostyczna mapa synoptyczna na godz. 12 UTC, 23.12.2023 roku.

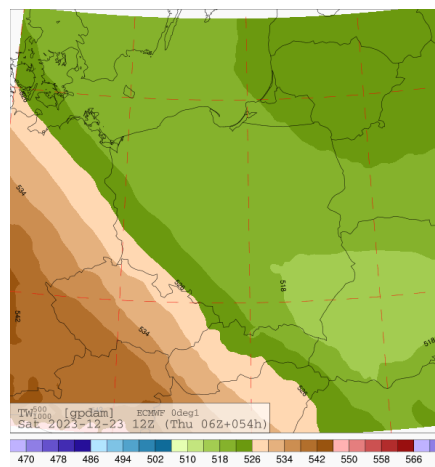


Rys. 104. Mapa synoptyczna, godz. 12 UTC, 23.12.2023 roku.

Z symulacji numerycznych wynikało, że w sobotę 23 XII 2023 roku pogodę w Polsce kształtować powinien niż, który będzie w dalszym ciągu się wypełniał. Front okluzji przemieścił się na obrzeża wiru cyklonalnego. Ośrodek o głębokości 975 hPa zalegać będzie na granicy Łotwy i Estonii. Nadal duży horyzontalny gradient ciśnienia. Należało się spodziewać zwiększonej prędkości wiatru i porywów. Progностyczne położenie ośrodka i przebieg powierzchni frontowej był w przybliżeniu zgodny. Na zachód i południowy zachód od Polski zaznaczony był rozległy front atmosferyczny, czego nie odzwierciedlało w pełni progностyczne położenie frontu atmosferycznego.



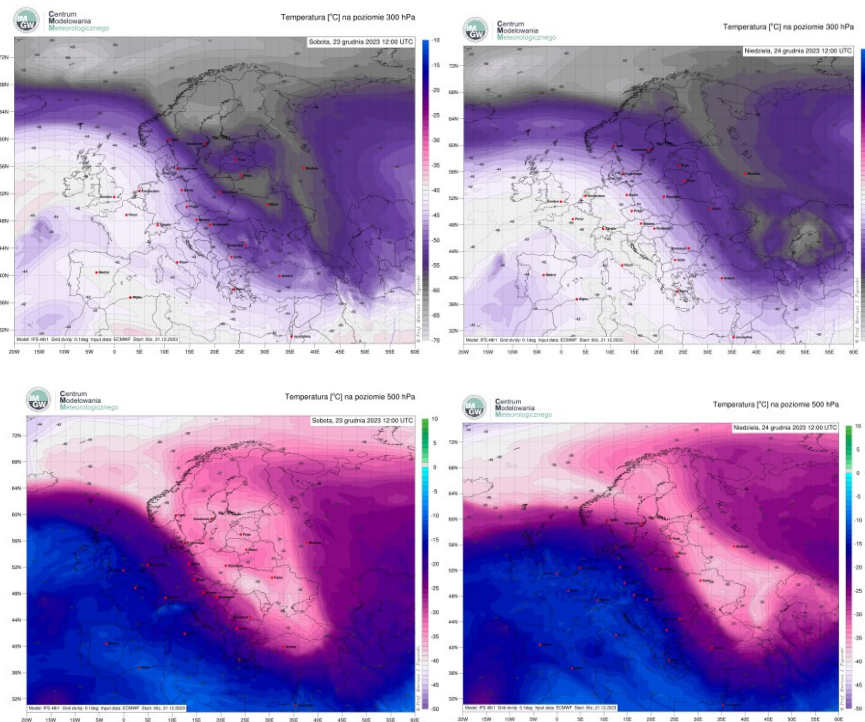
Rys. 105. Mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , godz. 12 UTC, 23.12.2023 roku.



Rys. 105. Mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , godz. 12 UTC, 23.12.2023 roku.

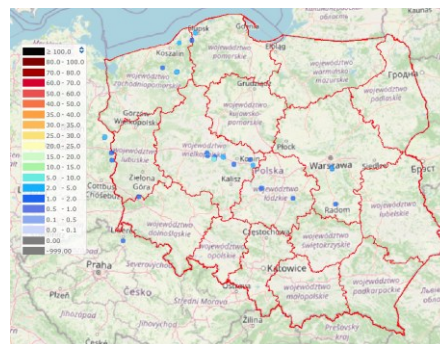


Z analizy map topografii barycznej względnej  $\tau W_{1000}^{500}$  wynikało, że na krańcach południowo zachodnich Polski zalegać będzie skraj kłina ciepła. Pozostały obszar Polski miał pozostać w zasięgu chłodniejszej masy powietrza. Najchłodniej powinno być w południowo wschodniej części kraju.

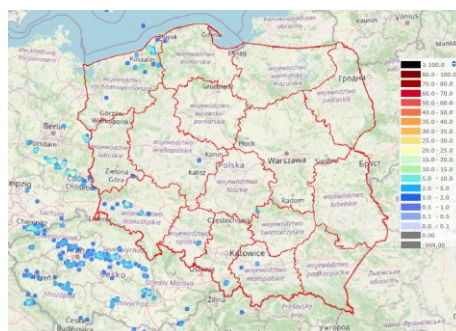


Rys. 106. Progностyczne pole temperatury na poziomie 500 hPa oraz 300 hPa o godz. 12 UTC, 23 i 24.12.2023 roku.

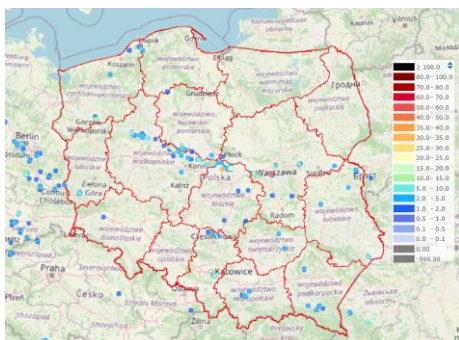
W dniach 21-23 XII 2023 roku w Polsce notowane były wyładowania atmosferyczne.



Rys. 107. Suma wyładowań za okres doby od godz. 06 UTC, 21 XII 2023 roku do godz. 06 UTC, 22.12.2023 roku.

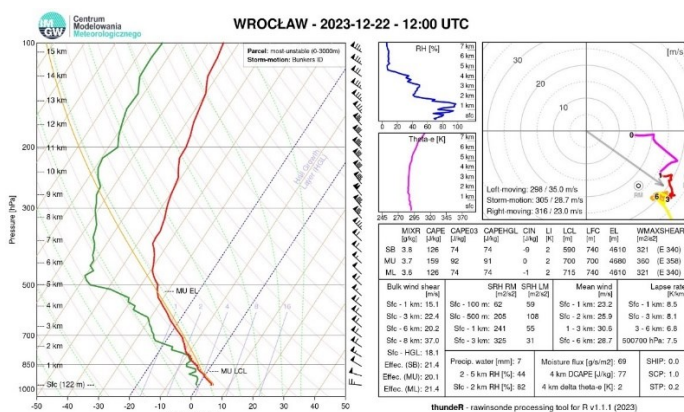


Rys. 108. Suma wyładowań za okres doby od godz. 06 UTC, 22 XII 2023 roku do godz. 06 UTC, 23.12.2023 roku.



Rys. 109. Suma wyładowań za okres doby od godz. 06 UTC, 23 XII 2023 roku do godz. 06 UTC, 24.12.2023 roku.

We wspomnianym okresie występowały sprzyjające warunki do elektryzacji chmur. Zimowe chmury *Cumulonimbus* nie są nigdy znacząco wypiętrzone jak to bywa w okresie letnim. Z analizy wynikało, że wierzchołki chmur *Cumulonimbus* osiągały lokalnie wysokość do 5 km. Przeważnie wierzchołki były niższe. Z elektryczności chmur wiadomo, że chmury o miąższości poniżej 3-4 km są chmurami nieaktywnymi elektrycznie, co nie oznacza, że są to chmury elektrycznie obojętne. Wręcz przeciwnie, w chmurze występują naładowane cząstki tworząc centra ładunków charakterystyczne dla chmur *Cb*, z tą różnicą, że wytworzone pole elektryczne jest za słabe, aby nastąpiło zainicjowanie wyładowania.



Rys. 110. Diagram Skew-T oraz hodograf wykonany na podstawie reanalizy ERA-5 dla Wrocławia dla godziny 12:00 UTC, 22.12.2023 roku, źródło: Centrum Modelowania Meteorologicznego IMGW-PIB.

Lokalnie były obserwowane chmury *Cumulonimbus capillatus mamma*. Miąższość niektórych chmur osiągała 4km, a ich wierzchołki znajdowało się na wysokości 4,5-5 km zatem pole elektryczne wewnątrz chmur *Cb* osiągało wartość przebicia, co umożliwiło inicjację wyładowań iskrowych. W zimowych chmurach *Cumulonimbus* pole elektryczne nie osiąga spektakularnych wartości, dlatego na ogół obserwuje się maksymalnie kilka zainicjowanych wyładowań iskrowych. Z mikrofizyki chmur *Cb* wynikało, że zbudowane były zarówno z kropeł przechłodzonych, kryształków lodu, płatków śniegu, krupy śnieżnej oraz małych zarodki gradowych, co niewątpliwie było sprzyjające elektryzacji chmur w mechanizmie zderzeniowym i powstanie odpowiedniego pola elektrycznego sprzyjającego inicjacji wyładowań. Zimowe chmury na ogół nie rozbudowują się do dużych wysokości, w związku z tym, chmury o mniejszej miąższości nie wykazują dużej aktywności elektrycznej. Jak wynika z obserwacji występujące chmury *Cumulonimbus* w rzeczywistości nie wykazywały dużej aktywności elektrycznej.

#### 4. Środowisko konwekcyjne rozwoju zjawisk burzowych dnia 22.12.2023

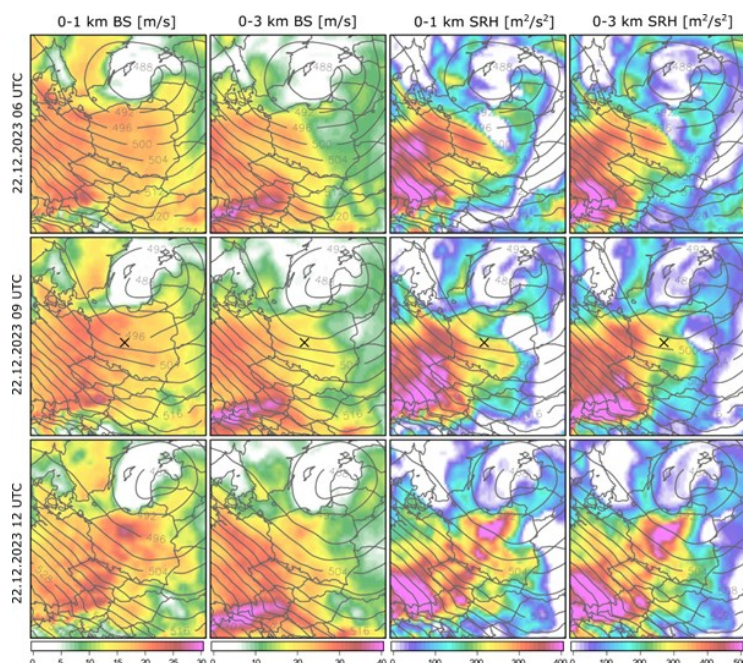
W dniu 22 grudnia 2023 roku pod wpływem sprzyjających warunków kinematycznych i termodynamicznych doszło do rozwoju komórek burzowych, w tym także superkomórek (czyli burz z rotującym prądem wstępującym, tzw. mezocyklonem). O godz. 09:58 UTC (+/- 5 min.) w miejscowości Grochowy (woj.



wielkopolskie) odnotowano przypadek trąby powietrznej związanej z mezocyklonem. W dalszej części opracowania przedstawiono wartości wybranych wskaźników konwekcyjnych w celu omówienia warunków atmosferycznych pod wpływem których rozwijały się burze. Wykorzystane w analizie dane z reanalizy ERA5 zostały przetworzone przy użyciu pakietu thundeR dzięki uprzejmości dr. Mateusza Taszarka (<https://rawinsonde.com/>). W analizie, potraktowano krok czasowy 09 UTC jako najlepiej odzwierciedlający warunki atmosferyczne, pod wpływem których rozwinął się mezocyklon, a także związana z nim trąba powietrzna.

Obecność centrum układu niskiego ciśnienia nad Bałtykiem i związany z nim duży poziomy gradient baryczny, spowodował gwałtowny spływ mas powietrza polarnego morskigo z sektora północno-zachodniego nad obszar Polski. Obserwowane warunki o silnym przepływie powietrza wiązały się z występowaniem wysokich wartości pionowych uskoku prędkości wiatru (ang. bulk wind shear; rys. 111). W ciągu dnia, wartości uskoku w warstwie 0-1 km przekraczały 25 m/s, a w warstwie 0-3 km było wynosiły ponad 20 m/s na zachodzie i w centrum kraju. W prognozowaniu operacyjnym, traktujemy podwyższone wartości uskoku wiatru (szczególnie z warstwy 0-1 km) jako bardzo istotne w procesie formowania się trąb powietrznych oraz występowania dużych prędkości wiatru.

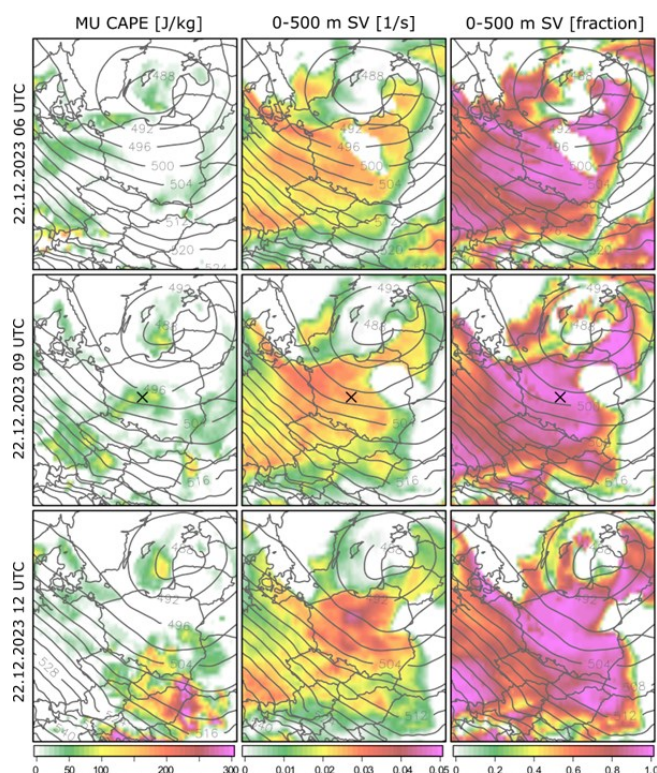
Istotnym parametrem z punktu prognozowania i analiz zjawisk burzowych jest również SRH (ang. storm-relative helicity), który odzwierciedla siły działające na prąd wstępujący w wyniku przemieszczania się burzy w określonym kierunku przy określonej prędkości. Wartości tego parametru rosną wraz ze zwiększaniem się uskoku kierunkowych oraz prędkości wiatru, stąd podwyższone wartości tego parametru obserwowane były w warstwach 0-1 km oraz 0-3 km w omawianym dniu (rys. 111). Wartości SRH z warstwy 0-3 km ponad 300 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> w centrum i na zachodzie kraju, wskazywały na duże szanse występowania rotacji w obrębie chmur Cb oraz rozwój superkomórek burzowych. Wartości w warstwie 0-1 km wynosiły ponad 250 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> w znacznej części Polski zachodniej.



Rys. 111. Wartości pionowych prędkościowych uskoku wiatru (BS) z warstwy 0-1 km i 0-3 km (pierwsza i druga kolumna), a także skłonność wiatru względem burzy (SRH) z warstwy 0-1 km i 0-3 km (trzecia i czwarta kolumna). Wartości parametrów zostały przedstawione dla terminów 06, 09 i 12 UTC z dnia 22.12.2023. Linie na każdej z map przedstawiają wysokość geopotencjału 500 hPa [gpdam]. Miejsce oznaczone „X”, wskazuje na lokalizację, gdzie doszło do rozwoju trąby powietrznej.

Istotnym w procesie formowania się superkomórek burzowych jest nie tylko pionowy uskok wiatru, ale również horyzontalny napływ powietrza, który w ujęciu wektorowym można rozpatrywać strumieniowo (ang. streamwise) oraz w poprzek (ang. crosswise). Im bardziej przepływ powietrza względem burzy jest strumieniowy, tym bardziej sprzyja to powstawaniu silnych zawirowań pionowych. Parametr opisujący ten mechanizm określa się jako SV (ang. streamwise vorticity). Obecnie, wiele prac wskazuje na dużą przydatność tego parametru z warstwy 0-500 m, w zakresie wyróżniania środowisk konwekcyjnych związanych z generowaniem trąb powietrznych, bądź

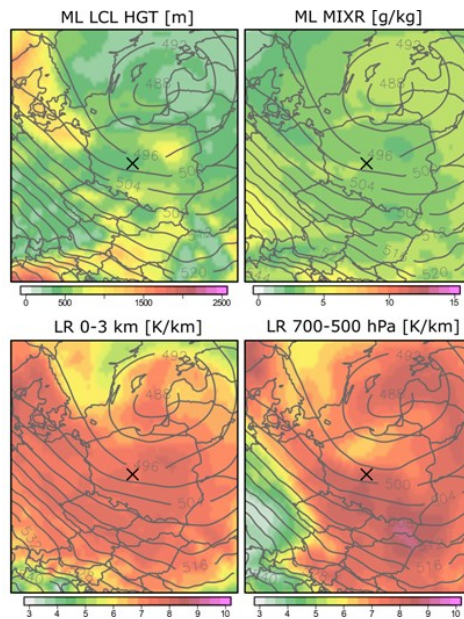
brakiem ich występowania (Coffer i Parker 2018; Coffer i in. 2019, 2020). Wartości z reanalizy ERA5 wskazują na podwyższone wartości SV w Polsce zachodniej (godz. 06 i 09 UTC), a także w centrum i na północy kraju w późniejszych godzinach (rys. 112). Istotnym jest również określenie, jaka frakcja napływu SV związana jest z przepływem strumieniowym. Wartości stanowiące niemal 100% (czyli 1.0 na mapach) widoczne na rys. 112, stanowią bardzo dobre warunki do rozwoju pionowych zawirowań powietrza. Ważne jest jednak zestawienie tych warunków z parametrem świadczącym o chwiejności atmosfery. W tym celu wykorzystano wartość energii potencjalnej dostępnej drogą konwekcji z tzw. najbardziej niestabilnej warstwy - MU CAPE (ang. most unstable convective available potential energy). W przypadku miesięcy zimowych, niestabilność powstała przy napływie chłodnych mas powietrza nie osiąga z reguły dużych wartości, jednak sama jej obecność w środowiskach o dużym przepływie jest wystarczająca, aby doszło do powstania i rozwoju niebezpiecznych zjawisk konwekcyjnych. W analizowanej sytuacji, dane z reanalizy ERA5 wskazują na występowanie wartości rzędu 100 J/kg na obszarze Wielkopolski o godz. 09 UTC.



Rys. 112. Wartości energii potencjalnej dostępnej drogą konwekcji z najbardziej niestabilnej warstwy (MU CAPE; pierwsza kolumna), wartości streamwise vorticity (SV) oraz frakcja napływu SV związana z przepływem strumieniowym (druga i trzecia kolumna). Wartości parametrów zostały przedstawione dla terminów 06, 09 i 12 UTC z dnia 22.12.2023. Linie na każdej z map przedstawiają wysokość geopotencjału 500 hPa [gpdam]. Miejsce oznaczone „X”, wskazuje na lokalizację, gdzie doszło do rozwoju trąby powietrznej.

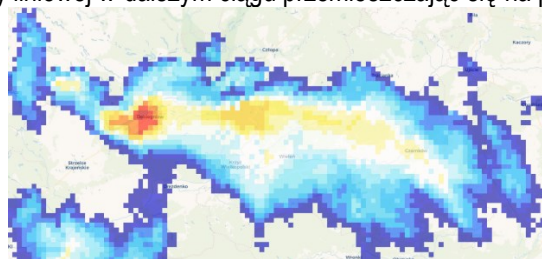
Elementem świadczącym o sprzyjających warunkach rozwoju trąby powietrznej jest również relatywnie niska wysokość poziomu kondensacji (LCL, ang. lifting condensation level; rys. 113) obserwowana na zachodzie kraju. Zawartość wilgoci absolutnej dostępnej w warstwie granicznej atmosfery (wyrażonej poprzez tzw. średni stosunek mieszania - MIXR; ang. mixing ratio) osiągała stosunkowo niskie wartości ze względu na niską temperaturę napływającej masy powietrza. Ograniczona zawartość wilgoci absolutnej została jednak zrekompensowana przez znaczne pionowe gradienty temperatury (LR, ang. lapse rate). Zarówno w dolnej (0-3 km) i środkowej troposferze (700-500 hPa) wskazano na ich wysokie wartości w obrębie prawie całego kraju (7,5-8,0 K/km). Zestawiając wartości analizowanych parametrów, można wskazać, że obszar Wielkopolski charakteryzowały warunki sprzyjające rozwojowi burz o charakterze mini-superkomórek typowych dla pory zimowej (warunki niskiej niestabilności termodynamicznej i dużego uskoku wiatru, ang. low CAPE-high SHEAR). Sąsiednie regiony charakteryzowały wyższe poziomy kondensacji i mniej sprzyjające warunki kinematyczne oraz termodynamiczne, co wskazywało na znacznie mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznych zjawisk konwekcyjnych.





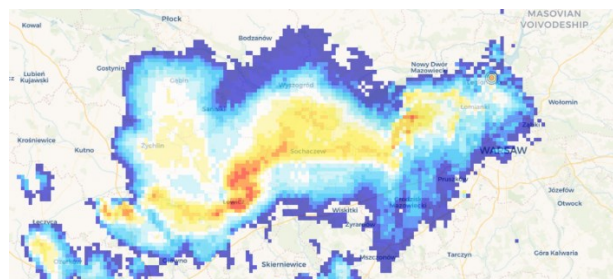
Rys. 113. Wysokość poziomu kondensacji (LCL), średniego stosunku zmieszania (MIXR) oraz pionowy gradient temperatury (LR) z warstw 0-3 km i 700-500 hPa. Wartości parametrów zostały przedstawione dla terminu 09 UTC z dnia 22.12.2023. Linie na każdej z map przedstawiają wysokość geopotencjału 500 hPa [gpdam]. Miejsce oznaczone „X”, wskazuje na lokalizację, gdzie doszło do rozwoju trąby powietrznej.

W piątek 22 grudnia 2023 roku już od godzin porannych dochodziło do rozwoju konwekcji. Komórki konwekcyjne organizowały się w klastry lub mini-superkomórki burzowe. Około godziny 06:00 CET klaster, składający się z wielu komórek konwekcyjnych wkroczył na terytorium Polski znad Niemiec i przemieszczał się na południowy wschód. Około godziny 07:00 w rejonie Krzyża Wielkopolskiego zaczął wykazywać cechy formy liniowej w dalszym ciągu przemieszczając się na południowy wschód.



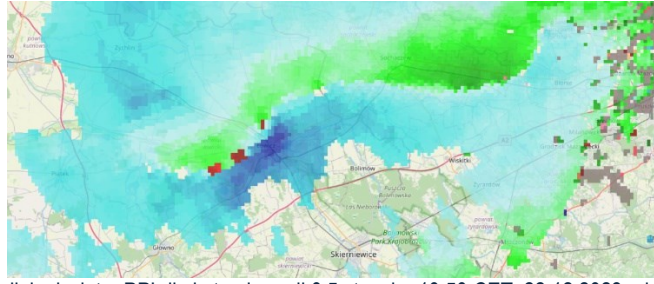
Rys. 114. Rozkład odbiciowości radarowej układu liniowego. 07:30 CET, 22.12.2023 roku.

Około godziny 10:50 CET znajdując się nad Łowiczem rozkład odbiciowości radarowej układu, wytworzony dla wysokości 1km AGL wykazywał cechy broken S signature.



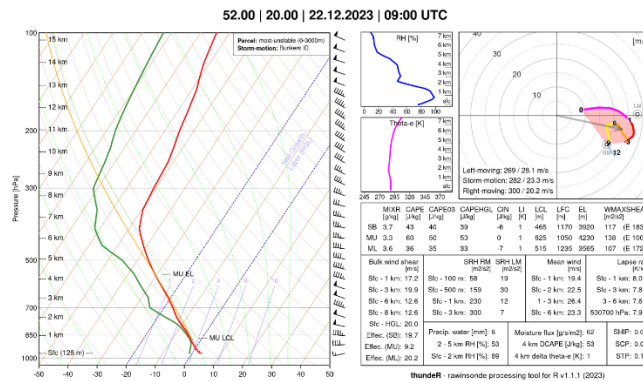
Rys. 115. Broken S signature. 10:50 CET, 22.12.2023 roku.

Rozkład prędkości radialnej PPI dla kąta elewacji 0.5 stopnia wskazywał w tym momencie na rozwój mezo zawirowania w obrębie południowo zachodniej części układu. Należy zaznaczyć, że układ ten znajdował się około godziny 11:00 w szczycie swojej intensywności.



Rys. 116. Rozkład prędkości radialnej wiatru PPI dla kąta elewacji 0.5 stopnia. 10:50 CET, 22.12.2023 roku.

Zobrazowanie rozkładu prędkości radialnej wiatru dla kąta elewacji 0.5 stopnia, wykonane na podstawie danych zebranych przez radar meteorologiczny, znajdujący się w Legionowie ukazało sygnaturę charakterystyczną dla obecności ruchu wirowego w układzie, dokładnie w miejscu obecności broken S signature.



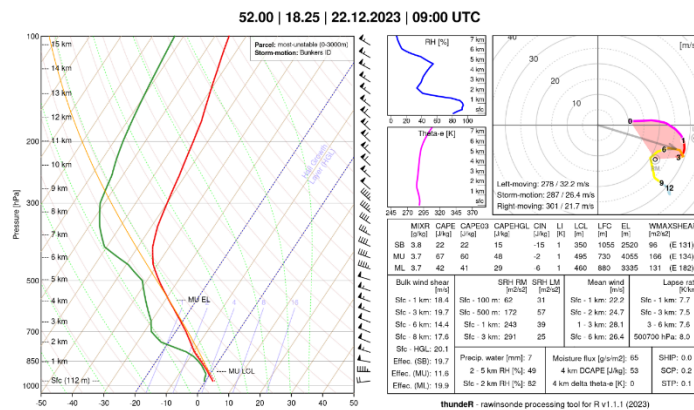
Rys. 117. Diagram Skew-T oraz hodograf wykonany na podstawie reanalizy ERA-5 dla punktu właściwego dla Łowicza dla godziny 10:00 CET.

Dane dostarczone przez reanalizę ERA-5 świadczą o umiarkowanych warunkach termodynamicznych dla rozwoju intensywnych zjawisk związanych z konwekcją. Gradienty temperatury w dolnej troposferze wynosiły w przybliżeniu 8 stopni Celsjusza. Energia potencjalna dostępna drogą konwekcji jest niewielka, co przekłada się na niezbyt wysoki poziom równowagi, wynoszący około 4km. Należy wziąć pod uwagę, że obecność oddziałującego ośrodka niskiego ciśnienia wpływała wspomagająco na proces konwekcji, stąd sama teoria cząstki próbnej dostarcza w tym przypadku danych o ograniczonej wiarygodności, niedoszacowując intensywności procesu wznoszenia. Pionowy profil warstwie 0-1.2km AGL cechował się wysoką wilgotnością względną (od 80 do ponad 95%), która powyżej poziomu 1.5 km AGL spadała do 40 procent. Wysoka wilgotność względna na wysokości od 800 do 1000 metrów wskazywała na przewidywaną przez reanalizę obecność zachmurzenia warstwowego. Należy zauważyć, że spadek wilgotności powyżej wysokości 1.5km wskazywał na możliwość wystąpienia procesu chłodzenia przez ewaporację. Na organizację procesu konwekcji korzystnie wpływały warunki kinematyczne. Układ występował w środowisku silnego przepływu poziomego mas powietrza: średni wiatr 0-6km: 23.3 m/s, 1-3km: 26.4 m/s, 0-1km: 19.4 m/s. Profil wiatru wskazywał na istnienie dominującego uskoku prędkościowego z pomniejszym uskokiem kierunkowym. Należy zauważyć, że tego typu warunki faworyzują rozwój zorganizowanych formacji liniowych oraz w nieco mniejszym stopniu mini-superkomórek burzowych. Środowisko, w którym występował układ, sprzyjało głównie występowaniu silnych porywów wiatru (silny przepływ w atmosferze, chłodzenie przez ewaporację). Istotnym czynnikiem ryzyka było również ograniczone prawdopodobieństwo wystąpienia trąby powietrznej w tym rejonie. Kształt hodografu w warstwie 0-3km AGL odwzorowywał wzorzec, który koreluje z występowaniem mezocyklonów oraz trąb powietrznych, co w połączeniu z niskim poziomem LCL stanowiło w tym przypadku istotny sygnał o możliwości wystąpienia tego zjawiska. Ostatnim czynnikiem ryzyka był możliwy opad gradu (sprzyjające warunki kinematyczne do utrzymywania gradzin w obrębie chmury).

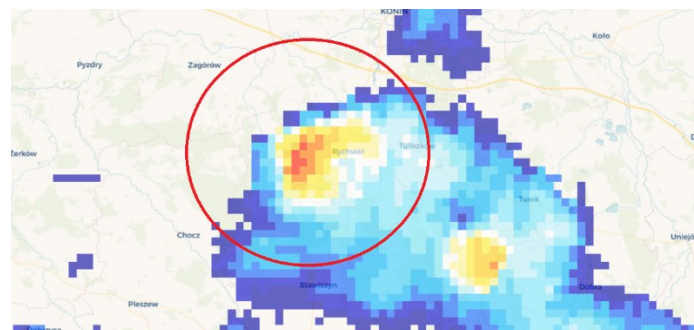
Interesujące warunki występowały również w rejonie Wielkopolski. Pionowy profil termodynamiczny oraz hodograf wykonany na podstawie danych z godziny 10:00 CET dostarczonych przez reanalizę ERA-5 dla punktu reprezentatywnego dla miejscowości Rychwał wskazuje tak jak poprzedni przypadek na ograniczone warunki termodynamiczne. Pionowe gradienty temperatury w środkowej i dolnej troposferze wynoszą około 7.6 stopnia Celsjusza na kilometr. Energia potencjalna dostępna drogą konwekcji także nie jest imponująca, a wysokość poziomu równowagi wynosi około 4km AGL. Ponownie w dolnym kilometrze jest obecna warstwa, cechująca się wysoką wilgotnością względną, a bezpośrednio nad nią występuje znaczny spadek jej wartości. Warunki



termodynamiczne w środowisku wspomaganym przez obecność ośrodka niskiego ciśnienia są umiarkowane dla rozwoju głębokiej i wilgotnej konwekcji w tym obszarze. Bardzo istotny jest pionowy profil wiatru, wskazujący na silny przepływ mas powietrza w troposferze: średni wiatr 0-6km: 26.4 m/s, 1-3km: 28.1 m/s, 0-1km: 22.2 m/s. Należy zwrócić uwagę na silny uskoc wiatru w warstwie 0-1km wynoszący ponad 18m/s. Pionowy rozkład kierunku przepływu jest podobny do poprzednio omawianego przypadku natomiast przepływ jest silniejszy w warstwie 1-5km AGL. Środowisko występujące w rejonie Wielkopolski sprzyjało rozbudowie zorganizowanych struktur konwekcyjnych: układów liniowych oraz mini-superkomórek burzowych. Ponownie hodograf cechuje się bardzo charakterystycznym kształtem, sprzyjającym występowaniu mezocyklonów i trąb powietrznych. Głównymi czynnikami ryzyka, które są charakterystyczne dla występujących warunków są silne porywy wiatru (dynamika przepływu oraz chłodzenie przez ewaporację), wystąpienie trąby powietrznej (profil wiatru, uskoki oraz niski poziom LCL), a także częściowo opady gradu. W wymienionych warunkach doszło do rozwoju mini-superkomórki burzowej, która w rejonie miejscowości Rychwał doprowadziła do wystąpienia trąby powietrznej około godziny 11:00 CET. Na podstawie oględzin miejsca zdarzenia intensywność tornada została oszacowana na IF2 w międzynarodowej skali Fujity.



Rys. 118. Diagram Skew-T oraz hodograf wygenerowany na podstawie danych z reanalizy ERA-5 dla okolic miejscowości Rychwał. 10:00 CET.



Rys. 119. Zobrazowanie CAPPI rozkładu odbiciowości radarowej na wysokości 1km. Godzina 10:50 CET, 22.12.2023 roku. Superkomórka zaznaczona czerwonym okręgiem.

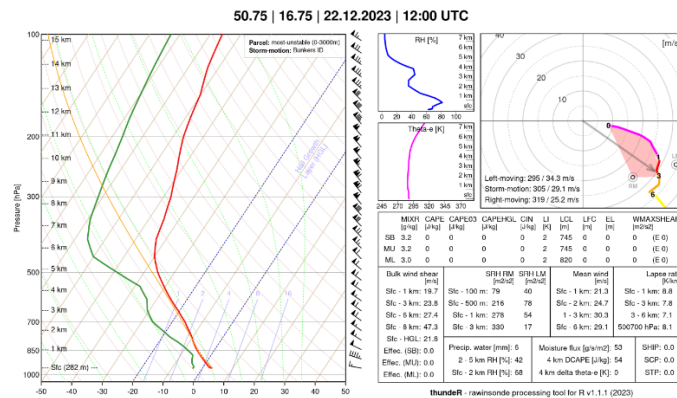
Zobrazowanie radarowe CAPPI w tym przypadku nie dostarczyło wyraźnych i charakterystycznych sygnatur, właściwych dla obecności mezocyklonu. Głównym powodem tego faktu jest znaczna odległość od najbliższego radaru meteorologicznego.

Wyraźne sygnatury były widoczne w przypadku mini-superkomórki burzowej, która występowała w rejonie Koniecpola około godziny 13:00. Posiadała one wyraźnie wykształcone echo radarowe w kształcie haka.



Rys. 120. Rozkład odbiciowości radarowej z godziny 13:00 CET, 22.12.2023 roku, mini-superkomórki burzowej z widocznym odbiciem radarowym w kształcie haka.

Superkomórka ta występowała w warunkach podobnych do poprzednio wymienionych przypadków.



Rys. 121. Diagram Skew-T oraz hodograf wygenerowany na podstawie danych z reanalizy ERA-5 dla okolic miejscowości Koniecpol. 13:00 CET.

Na powyższym diagramie należy zwrócić szczególną uwagę na bardzo silne uskoki wiatru: 0-1km 19.7 m/s, 0-6km: 27.4. Profil wiatru charakteryzuje się bardzo silnym przepływem mas powietrza oraz skrętnością przekraczającą  $300 \frac{m^2}{s^2}$ .

### 5. Zarejestrowane skutki związane z wystąpieniem wyżej opisywanego zdarzenia.

W związku z opisywaną sytuacją pogodową, niemal w całym kraju doszło do wystąpienia negatywnych skutków gwałtownych zjawisk anemologicznych, które potwierdziły tym samym wydawane przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej ostrzeżenia dotyczące silnych i porywistych prędkości wiatru.

Do godziny 10:00 22 grudnia rzecznik prasowy Komendanta Głównego PSP st. bryg. Karol Kierzkowski, poinformował o około 1360 zgłoszeniach dotyczących usuwania skutków silnego wiatru. Najwięcej interwencji podjęli strażacy z województw: zachodniopomorskiego (443), wielkopolskiego (194), pomorskiego (153), dolnośląskiego (132), kujawsko-pomorskiego (107). Dotyczyły one przede wszystkim usuwania wiatrołomów, udrażniania szlaków komunikacyjnych. Lokalnie dochodziło również do uszkodzeń powierzchni dachowej na budynkach mieszkalnych i gospodarczych oraz budynkach użyteczności publicznej, jak w przypadku szkoły we Włynkówku w powiecie słupskim. Do groźnych zdarzeń dochodziło również w wyniku uderzeń łamanych drzew i gałęzi w poruszające się pojazdy. Do takich zdarzeń dochodziło między innymi w powiecie kamieńskim oraz powiecie szczecineckim, gdzie w karetkę pogotowia uderzyło upadające drzewo. Podobna sytuacja miała miejsce w nocy 21/22 grudnia w rejonie drogi krajowej DK10, gdzie kierujący samochodem ciężarowym uderzył w leżące na drodze drzewo blokując dojazd służb ratowniczych. W ciągu dnia 22 grudnia sytuacja nie ulegała wyraźnej poprawie, co skutkowało kolejnymi interwencjami, których liczba w godzinach wieczornych osiągała już ponad 3 tys zgłoszeń, przy czym najwięcej zdarzeń ponownie występowało w woj. zachodniopomorskim, wielkopolskim i pomorskim.



Silny wiatr powodował również zakłócenia w ruchu lotniczym, dodatkowo sytuację utrudniały występujące miejscami zjawiska burzowe. W wyniku uderzenia pioruna, nad ranem 22 grudnia, samolot linii Wizz Air lecący z Krakowa, musiał lądować awaryjnie w Katowicach.

W wyniku wystąpienia, na południe od Konina w rejonie Rychwał trąby powietrznej doszło do uszkodzenia kilku budynków i zniszczenia energetycznych linii przesyłowych wysokiego napięcia oraz zniszczenia niewielkiego obszaru leśnego. W tym samym dniu, rozległe zniszczenia, powstałe wskutek powalenia drzew odnotowano również w obrębie kompleksu cementarnego w Żyrardowie.

Obok skutków ściśle związanych z wysokimi prędkościami wiatru, sporo zgłoszeń dotyczyło również podtopień i związanej z nimi koniczności wypompowywania wody z zalanych budynków, powstających w wyniku występujących lokalnie silnych opadów deszczu, deszczu ze śniegiem i śniegu.

Biorąc pod uwagę zakres przestrzenny występujących gwałtownych zdarzeń pogodowych oraz duży udział szkód komunikacyjnych, w szczególności należy pamiętać o śledzeniu prognoz meteorologicznych i monitorowania wydawanych ostrzeżeń publikowanych na stronie [www.meteo.imgw.pl](http://www.meteo.imgw.pl) w celu minimalizowania potencjalnych zagrożeń.