# Achtergronddocument Blauwe Omgevingsvisie

Behorend bij de visie “Klimaatbestendig Fryslân 2050+”



Wetterskip Fryslân

Februari 2023

# Inhoud


1. Inleiding ..... 3
2. Systeemanalyse ..... 5
   2.1. Fryslân ..... 5
      Ontwikkeling van het watersysteem ..... 7
      Ontwikkeling van de waterkwaliteit en waterkwaliteit ..... 11
      Het functioneren van het grondwatersysteem ..... 13
      De bodem van Fryslân ..... 17
      De waterbalans van Fryslân ..... 17
      Drinkwaterwinning in Fryslân ..... 19
      Bebouwd gebied ..... 20
   2.2. Zand ..... 20
      Hoge Zandgronden ..... 22
      Noardlike Fryske Walden ..... 23
      Gaasterland ..... 24
   2.3. Veen ..... 24
      Diepe veenpolders ..... 26
      Puur (dik) veen ..... 26
      Klei op veen ..... 27
   2.4. Klei ..... 28
      De Greidhoeke ..... 30
      De noordelijke kleischil ..... 31
   2.5 Friese Waddeneilanden ..... 32
3. Impact autonome ontwikkeling en klimaatverandering ..... 35
   3.1. Autonome ontwikkelingen ..... 35
      Bodemdaling ..... 35
      Veenoxidatie en maaivelddaling ..... 35
      Zoetwaterbalans ..... 36
      Ruimtelijke ontwikkelingen in de pijplijn ..... 36
      Assets van Wetterskip Fryslân ..... 36
   3.2. Klimaatverandering ..... 37
   3.3. Fryslân ..... 37
      Toekomstige veranderingen van het grondwatersysteem ..... 37
      Toekomstige veranderingen in het oppervlaktewatersysteem ..... 44
      Ontwikkeling van de waterveiligheid ..... 47

Drinkwaterwinning ..... 48
Waterkwaliteit ..... 49
Bebouwd gebied ..... 49
Bronnenlijst ..... 52
Bijlage 1: Drinkwaterwinningen en leidingnetwerk ..... 53
Bijlage 2: Klimaatverandering ..... 54
Bijlage 3: Samenvatting reactie peer review grondwaterstudie ..... 56

# 1. Inleiding

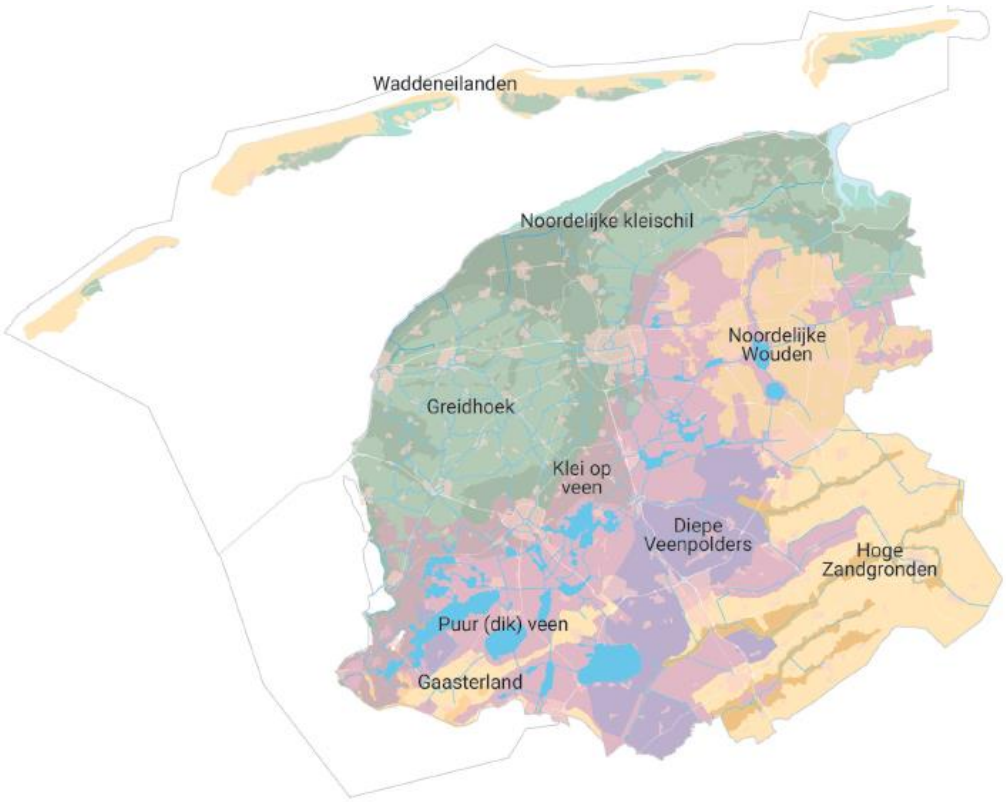
Dit is het achtergronddocument, behorend bij de Friese Blauwe Omgevingsvisie (BOVI) en Blauwe drager voor het jaar 2050 en verder. In deze visie “Fryslân klimaatbestendig 2050+” hebben Wetterskip Fryslân en provincie Fryslân gezamenlijk de opgaven in het water- en bodemsysteem van de provincie Fryslân en het Groninger Westerkwartier uitgewerkt en agenderen ze welke transitie nodig is om water en bodem meer sturend te laten zijn in de ruimtelijke inrichting.




Op de manier waarop het systeem nu is ingericht en de toekomstige uitdagingen die op het gebied afkomen, loopt het Friese water- en bodemsysteem tegen grenzen aan. Om het gebied voor te bereiden op de verwachte klimaatverandering, zeespiegelstijging en autonome ontwikkelingen zoals maaivelddaling door veenoxidatie, is er aanzienlijk meer ruimte voor water nodig. Dit heeft consequenties voor het huidige ruimtegebruik.

Voor deze visie is een analyse van het water- en bodemsysteem gemaakt en de impact die autonome ontwikkelingen en klimaatverandering daarop hebben. Hiervoor zijn veel bestaande onderzoeken, studies en rapporten voor gebruikt. Dit achtergronddocument geeft deze analyse weer en biedt een verdieping op de analyse en visie die in hoofdstuk 2 en 3 van de Friese Blauwe Omgevingsvisie (BOVI) wordt gegeven.

Leeswijzer
Het eerste hoofdstuk is een systeemanalyse van Fryslân. Daarbij wordt ook specifiek aandacht besteed aan de verschillende deelgebieden van Fryslân, gebaseerd op de bodemtypen, zie figuur 1. Deze deelgebieden komen ook weer terug in de Blauwe omgevingsvisie.
Het tweede hoofdstuk beschrijft de impact van autonome ontwikkelingen en klimaatverandering op het water- en bodemsysteem van Fryslân.




*Figuur 1: Verschillende bodemtypen verdelen Fryslân in deelgebieden(Bron: Werkboek verkenning BOVI Wetterskip Fryslân, H+N+S Landschapsarchitecten, 2021)*

# 2. Systeemanalyse

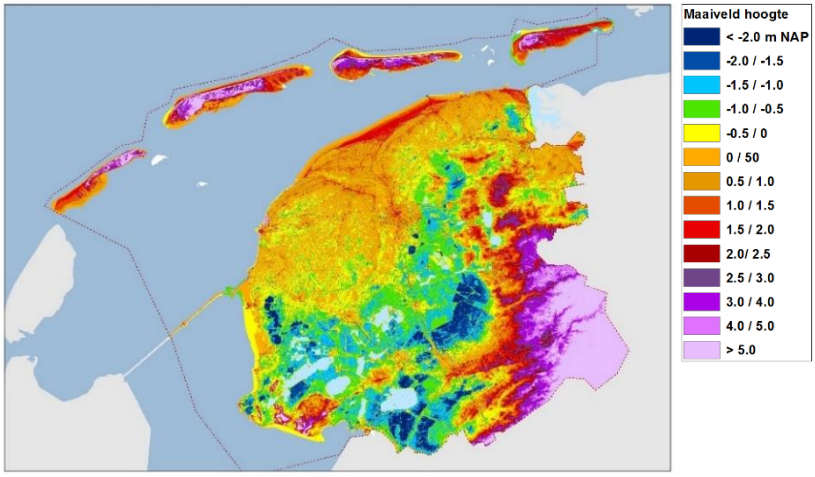
In de systeemanalyse beschrijven we het functioneren van het watersysteem in Fryslân en het Groninger Westerkwartier. In de eerste paragraaf beschrijven we het bodem- en watersysteem van het vaste land van Fryslân en het westerkwartier en de samenhang tussen de verschillende gebieden. In de daarop volgende paragrafen beschrijven we het bodem- en watersysteem van de deelgebieden. In de laatste paragraaf wordt het bodem- en watersysteem van de Waddeneilanden beschreven.

## 2.1. Fryslân

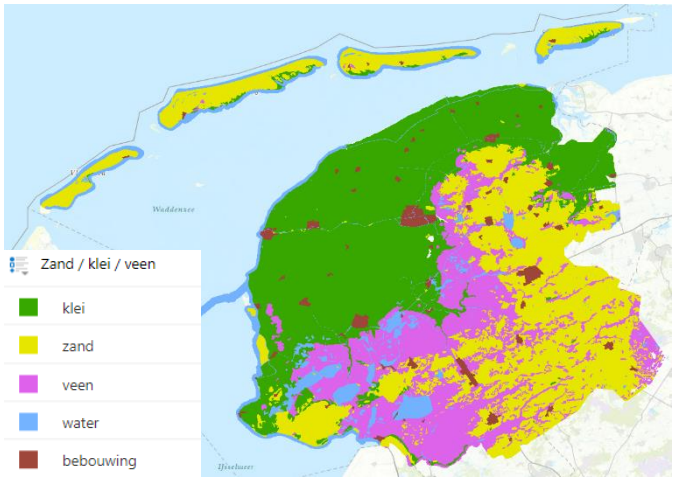
Het vaste land van Fryslân en het westerkwartier wordt gekenmerkt door grote hoogteverschillen. Op de hoogtekaart van Fryslân (Figuur 2) is dit duidelijk te zien. Naast de maaiveldhoogte is ook de bodemopbouw een belangrijk kenmerk. In figuur 3 is te zien dat de het gebied uit 3 hoofdsoorten bodems bestaat, namelijk klei, zand en veen.

Uit een vergelijking van de hoogtekaart en de bodemkaart blijkt dat de zandgronden in het oosten en Gaasterland relatief hoog liggen. De hoogte varieert van ca. 1 m boven NAP tot ca. 20 m boven NAP. Het midden van Fryslân bestaat uit veengebieden. Deze veengebieden liggen onder NAP en vormen daarmee het lage midden van Fryslân. De maaiveldhoogte in de kleigebieden ligt rond NAP of net erboven.

De bodemopbouw en de maaiveldhoogte zijn het resultaat van natuurlijke processen, maar ook van menselijk ingrijpen.




*Figuur 2: Hoogtekaart van Fryslân*




*Figuur 3: Bodemkaart van Fryslân*

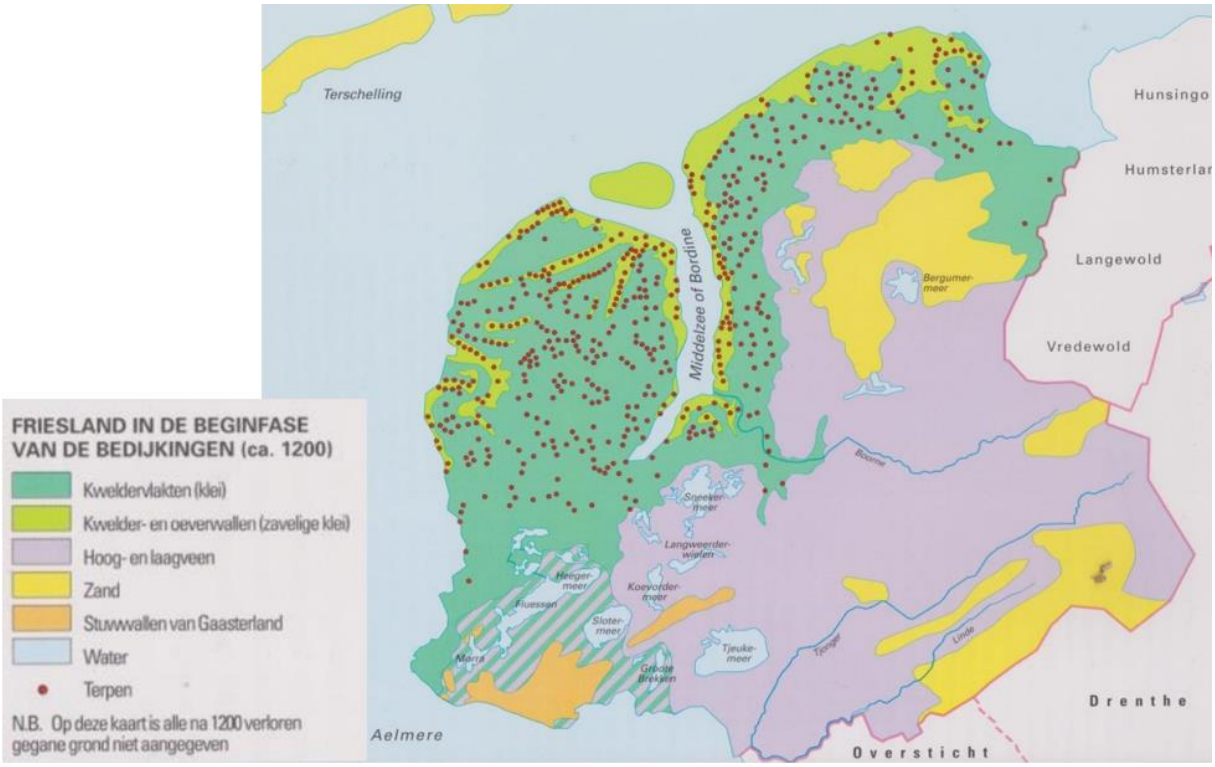
De basis van Fryslân is gevormd tijdens de ijstijden. Deze basis bestaat uit zandgronden met keileemlagen. De hoogte bij Gaasterland is een restant van een stuwwal, die tijdens de ijstijd opgestuwd is door een landijs. De zee had tijdens de ijstijden geen invloed in Fryslân.

Na de ijstijd begon door het smelten van het landijs de zeespiegel te stijgen en werd het warmer. De zee kreeg steeds meer invloed en de afwatering stagneerde, waardoor in vrijwel het gehele gebied veenvorming plaats kon vinden. Alleen op de hoge zandruggen vond geen veenvorming plaats. De zeespiegel bleef stijgen en de zee kreeg steeds meer invloed en drong het gebied binnen. Een deel van het veen werd door de invloed van de zee weggeslagen en er ontstond een kwelderlandschap met zeeslenken, die ver het binnenland binnendrongen. Op de kwelders werd door de zee klei afgezet. Dit proces heeft het huidige kleigebied gevormd.

Een deel van het veengebied werd ook regelmatig door zeewater overspoeld, waardoor hier een kleilaag op het veen is afgezet. Dit zijn nu de klei op veen gebieden.

De rest van Fryslân bestond toen nog uit moerassen met veenbeken, die het overtollige water richting zee afvoerden.

De mens kreeg steeds meer invloed op het landschap. In het kleilandschap werden terpen opgeworpen (zie figuur 4) en de hoogvenen werden afgegraven voor turfwinning. Door het afgraven van het veen werd de grondwaterstand lager en veranderde ook het karakter van de beken. Het hoogveen functioneerde als grote spons, die veel water kon vasthouden. De zandgronden, die na het afgraven van het veen aan de oppervlakte kwamen konden veel minder water vasthouden.

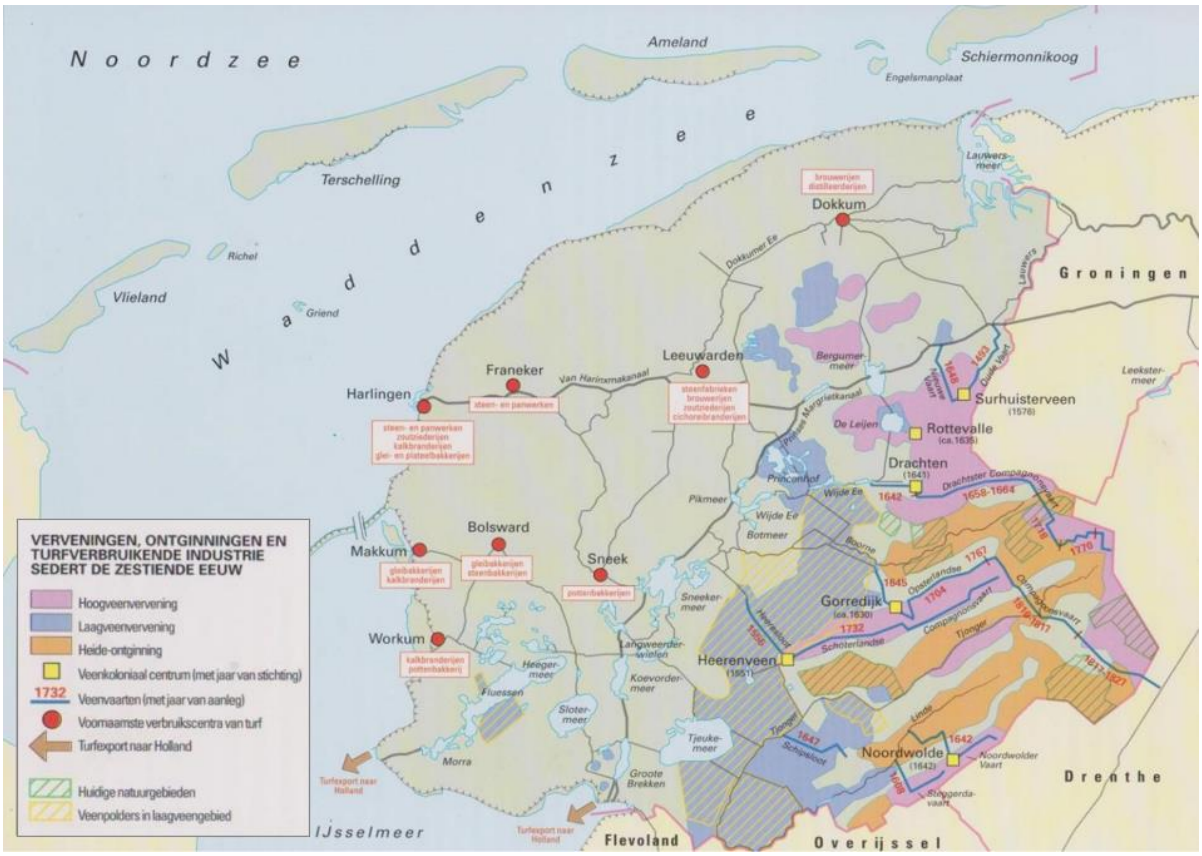



*Figuur 4: Fryslân in de beginfase van de bedijkingen rond 1200 (bron: 'De wereld van het Friese landschap' door M. Schroor, 1993)*

Nadat vrijwel al het hoogveen is afgegraven begint de vervening van de laagveengebieden. Deze gebieden liggen veel lager, waardoor bij het vervenen van laagveen een landschap met petgaten en legakkers ontstaat. De verveende gebieden zijn met behulp van gemalen drooggelegd en omgevormd

tot landbouwgrond. Deze gebieden worden nu diepe veenpolders genoemd vanwege de lage ligging ten opzichte van NAP en de omgeving.

Voor het transport van turf werden verschillende kanalen gegraven, zoals bijvoorbeeld de compagnonsvaarten (zie figuur 5).

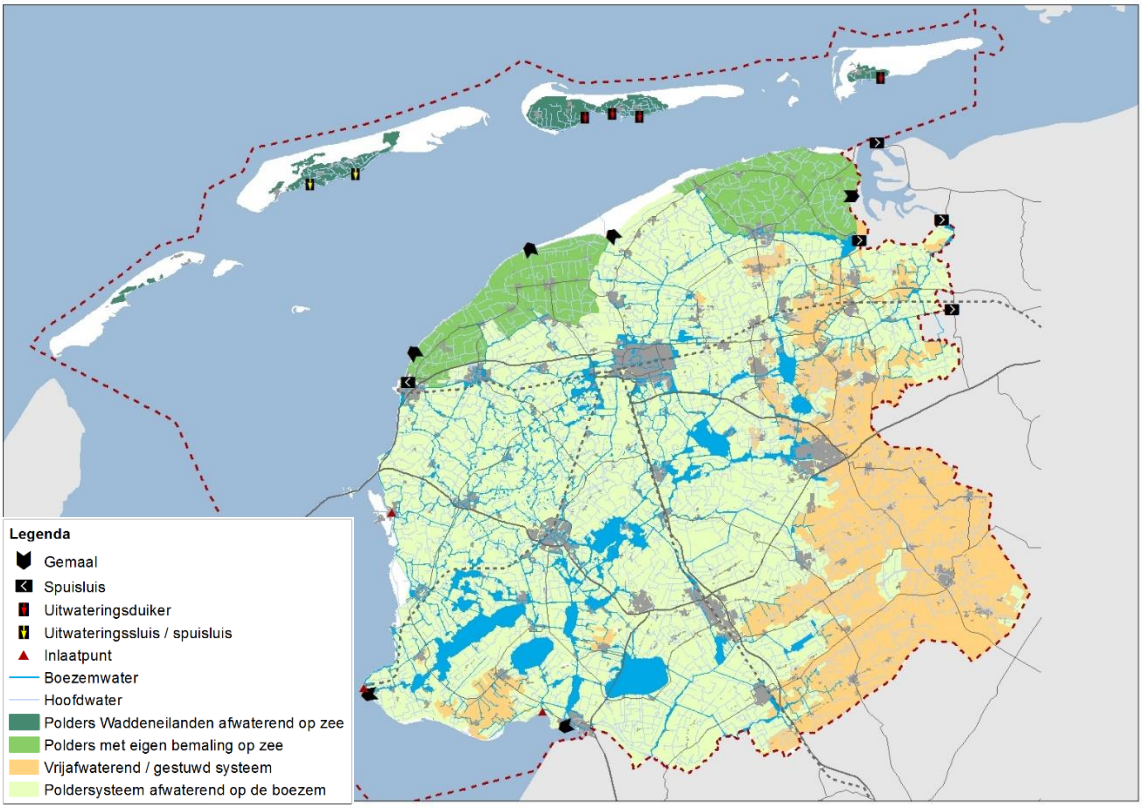



*Figuur 5: Overzicht ontwikkeling verveningen, veldontginningen en aanleg van vaarten in Fryslân (bron: 'De wereld van het Friese landschap' door M. Schroor, 1993)*

De rest van het laagveengebied is niet verveend, maar door verlaging van de grondwaterstanden omgevormd tot het huidige veenweidegebied.

## Ontwikkeling van het watersysteem

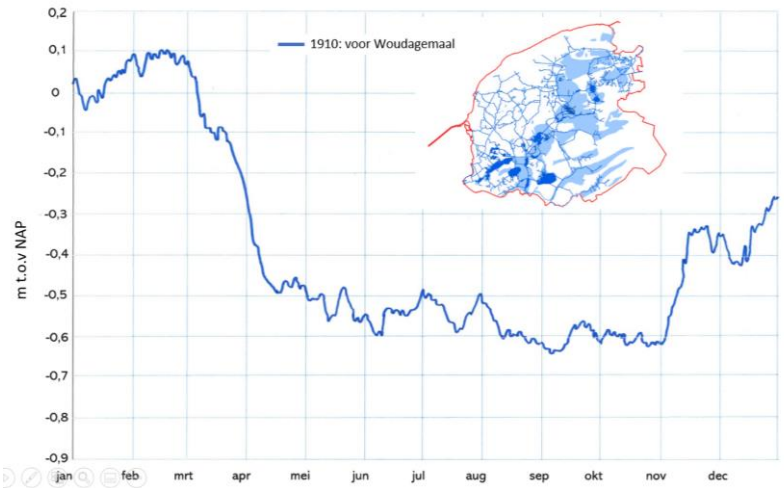
Het water van de beekdalen en de verschillende bemalen gebieden (polders) wordt via een stelsel van meren en kanalen naar zee afgevoerd. Dit geheel van meren en kanalen noemen we de Friese Boezem. In figuur 6 is een kaart weergegeven van het huidige boezemsysteem (donker blauwe kleuren). In deze kaart zijn ook de spuisluizen (Dokkumer Nieuwe Zijlen, Zoutkamp en Harlingen), de afvoergemalen (ir. D.F. Woudagemaal, J.L. Hooglandgemaal en De Heining) en de inlaten (Teroelsterkolk, Tacozijl, Makkum en J.L. Hooglandgemaal) aangegeven. De kleine inlaat bij Workum is niet opgenomen. Verder is ook de doorvoer bij Gaarkeuken richting Groningen op de kaart aangegeven. De Friese boezem heeft nu een vast peil van -0,52 m NAP met een beperkte fluctuaties in de waterstand, maar dit is niet altijd zo geweest.




*Figuur 6: Overzicht van de aan- en afvoerpunten van de Friese Boezem en de beekdalenen de afgekoppelde gebieden*

*Ontwikkeling van het boezemsysteem en de effecten op de waterstanden*

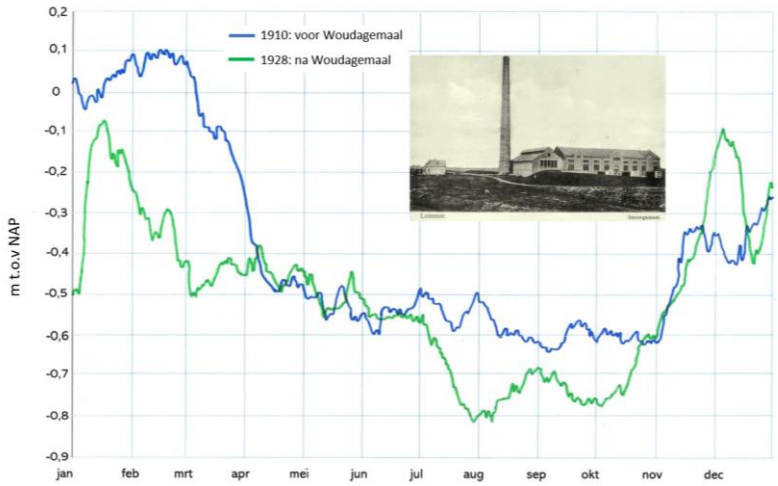
In het jaar 1910, vóór de bouw van het Woudagemaal was de Friese boezem veel groter, omdat veel gebieden nog niet waren ingepolderd. Het overtollig regenwater in de winter kon alleen met behulp van spuisluizen tijdens laag water naar de Zuiderzee en de Lauwerszee worden afgevoerd. Deze spuicapaciteit was beperkt. In figuur 7 is de gemiddelde boezemwaterstand (het gewogen gemiddelde van 6 waterstandsmeetpunten verspreid over Fryslân) in 1910 weergegeven. In de winter is de boezemwaterstand wel een halve meter hoger dan in de huidige situatie.




*Figuur 7: Boezemwaterstanden in 1910*

De laag gelegen gebieden stonden destijds blank (kaartje met blauwe gebieden in figuur 7). In de loop van het voorjaar zie je het water zakken. Maar doordat de ontwatering van (natte) percelen nog niet geoptimaliseerd was met drainage en diepe sloten, zakte het water in het voorjaar maar langzaam uit. In een droge zomer kon de waterstand verder uitzakken dan in de huidige situatie, omdat er geen inlaatmogelijkheden waren.

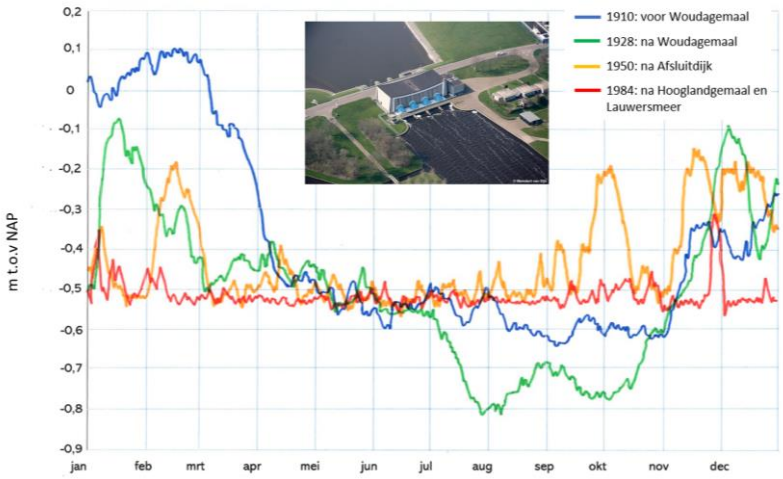
In 1920 werd het Woudagemaal gebouwd. De groene lijn in figuur 8 laat de boezemwaterstanden in 1928 zien. Wat opvalt is dat de waterstand in de winter minder hoog is, omdat met het gemaal het teveel aan neerslag beter kan worden afgevoerd. In het voorjaar daalt het boezempeil veel sneller, omdat er al een groot deel van het winterneerslagoverschot is afgevoerd door het gemaal. Vervolgens zie je in de zomer het peil erg ver wegzakken, omdat er geen mogelijkheden waren om zoet water in te laten. Dit leidde tot problemen voor de scheepvaart. Als de boezemwaterstand in droge zomers te ver uitzakte werd zout water ingelaten zodat de scheepvaart door kon gaan.




*Figuur 8: Boezemwaterstand op de Friese boezem* in 1910 en 1928

In 1932 werd de Zuiderzee door de afsluitdijk afgesloten van de Waddenzee en ontstond het “zoete” IJsselmeer. De oranje lijn in figuur 9 laat de boezemwaterstand in 1950 zien. In de winter zijn de boezemwaterstanden nog steeds hoger dan in de huidige situatie. Door de afsluiting van de Zuiderzee kan niet meer onder vrij verval worden afgevoerd naar het IJsselmeer. Wat opvalt is dat de boezemwaterstand in de zomer niet meer uitzakt. Dit komt omdat er met de inlaatsluis Teroelsterkolk (1935) zoet water kan worden ingelaten uit het inmiddels zoete IJsselmeer.

De afvoercapaciteit van de Friese boezem werd in 1966 verder verbeterd door de bouw van het Hooglandgemaal te Stavoren en de afsluiting van het Lauwerszee (1969). Door de afsluiting van de Lauwerszee ontstond het Lauwersmeer. Het peil op het Lauwersmeer is onder normale omstandigheden lager dan de Friese boezem, waardoor bij Dokkumer Nieuwe Zijlen meer en langer water afgevoerd kan worden. De oppervlakte van de boezem is inmiddels veel kleiner geworden doordat steeds meer delen van de provincie worden ingepolderd. Hierdoor is de berging in het systeem afgenomen. Het effect van al deze veranderingen op de waterstand is weergegeven met de rode lijn in figuur 9. Door de verbetering van de afvoercapaciteit (extra gemaal en betere spuimogelijkheden richting het Lauwersmeer) is het vanaf dit moment mogelijk de waterstand op de Friese boezem goed te reguleren. Alleen in extreem natte situaties wijken de waterstanden nog af van het vastgestelde waterpeil van -0,52 m NAP.

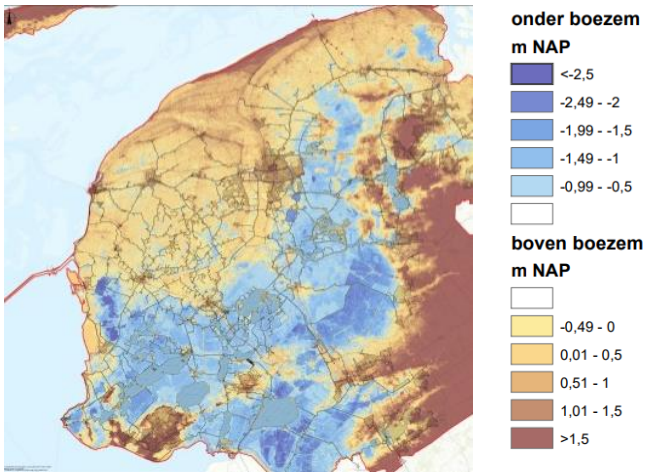



*Figuur 9: De waterstand op de Friese boezem in 1910, 1928, 1950 en 1984*

Daarnaast worden de weersverwachtingen ook steeds beter, waardoor het mogelijk is geworden te anticiperen door bijvoorbeeld voormalen. De waterstanden fluctueren nu jaarrond heel dicht rond het peil van -0,52 m NAP.

In figuur 6 is het huidige watersysteem van Fryslân weergegeven. Het watersysteem is een polder-boezemsysteem met vrijafstromende beken (gele gebieden) in het zuidoosten en afgekoppelde polders in het noorden (groene gebieden). De afgekoppelde polders water met een gemaal rechtstreeks af naar de Waddenzee of het Lauwersmeer, maar zijn wel afhankelijk van het Friese boezemsysteem voor de aanvoer van zoet water in de zomer. De polders hebben een lager peil dan de Friese boezem (donkerblauwe wateren) en wateren met gemalen af naar de boezem. De polders zijn voor de aanvoer van zoet water ook afhankelijk van de Friese boezem. In een deel van het vrijafstromende gebied kan in de zomer met behulp van gemalen water aangevoerd worden vanuit de Friese boezem.

In figuur 1 is de hoogte van het maaiveld aangegeven ten opzichte van het boezempeil. De blauw gekleurde gebieden liggen onder boezempeil. Dit gebied komt grotendeels overeen met de veengebieden en de diepe veenpolders. De gele en oranje kleuren liggen net boven boezempeil en komen grotendeel overeen met de kleigebieden. De rode kleuren liggen meer dan 2 m boven het boezempeil en komen grotendeels overeen met de zandgronden.




*Figuur 10: maaiveldhoogte Fryslân. De blauwe gebieden liggen onder het boezempeil van -0,52 m NAP.*

De Friese boezem heeft naast een belangrijke functie voor de waterhuishouding (wateraan- en -afvoer en berging) ook een belangrijke functie voor natuur, scheepvaart, visserij en recreatie.

De natuurvriendelijke oevers langs de meren en de verbindende kanalen in de boezem vormen met elkaar een netwerk. Dit levert een belangrijke ecologische verbindingsfunctie tussen de natuurgebieden en een versterking van de biodiversiteit.

## Ontwikkeling van de waterkwaliteit en waterkwaliteit

*Het verlies van ecologische waarden*

Lange tijd had Fryslân een goede waterkwaliteit. Er was weinig vervuiling en de beken en meren bewogen qua dynamiek en waterpeil met de seizoenen mee. Het water was helder, had een gevarieerde plantengroei en een grote soortenrijkdom aan vissen, insecten en amfibieën.

Vanaf ongeveer 1900 nam de waterkwaliteit rond steden snel af door verstedelijking en industrialisatie zoals strokartonfabrieken en slachterijen. Zuurstofloosheid resulteerde in vissterfte en dode kanalen.

In het landelijk gebied bleef de waterkwaliteit nog lang van goede waterkwaliteit. Door de intensivering van de landbouw in de jaren ’50 en ’60 ging ook in het landelijke gebied de waterkwaliteit achteruit. Enerzijds werd dit veroorzaakt door vervuiling door meststoffen en bestrijdingsmiddelen, anderzijds door de steeds verdergaande aanpassing van het watersysteem.

Waterbouwkundige aanpassingen zoals inpolderingen, kanalisatie van beken, de Afsluitdijk en het Hooglandgemaal hebben geleid tot een grote beheersing van het water. Dit kenmerkt zich door een sterk gecompartimenteerd systeem dat gericht is op een snelle afvoer van water en vaste waterpeilen. Hierdoor zijn bijvoorbeeld grote gebieden aan paai- en opgroeigebied verdwenen, zijn migratieroutes voor vis afgesloten en is het areaal waterriet steeds verder afgenomen.

De toegenomen voedselrijkdom in het water veroorzaakte een toename van de algenbloei waardoor het water troebel werd en de waterplanten in de jaren ’70 uit de meren verdwenen. De visstand veranderde naar een zeer hoge visstand met maar weinig soorten (voornamelijk Brasem en Snoekbaars). Verschillende soorten zoals bijvoorbeeld de Kwabaal (familie van de Kabeljauw) verdwenen uit Fryslân. Grootschalige bloei van giftige blauwalgen kwam in de zomer veel voor.

*Het keerpunt*

In 1970 werd, na vijftig jaar discussie, de Wet verontreiniging oppervlaktewater van kracht. Deze wet gaf een enorme impuls aan het terugdringen van vervuiling vanuit de industrie. Het invoeren van een heffing op vervuiling en een stelsel van vergunningverlening en handhaving bleek zeer effectief te zijn. Ook de bouw van rioolwaterzuiveringsinstallaties kwam goed op gang (door gemeenten, later de provincie en vervolgens het waterschap). In eerste instantie was dit vooral gericht op het verwijderen van zuurstofbindende stoffen. Later kwamen hier ook het gericht verwijderen van nutriënten uit afvalwater bij.

In de jaren ’80 kwam er meer aandacht voor de problematiek van de eutrofiëring en werd het mestbeleid ingevoerd om de hoeveelheid nutriënten in het water te verminderen. De Wet verontreiniging oppervlaktewateren (WVO) en het mestbeleid hebben in de jaren ’80 en ’90 tot een flinke vermindering van de belasting van het oppervlaktewater met nutriënten geleid. In deze periode is ook de aanpak van emissies van microverontreinigingen zoals zware metalen, PAK’s en bestrijdingsmiddelen van de grond gekomen.

*Integraal waterbeheer*
In de jaren ’90 kwam er meer aandacht voor integraal waterbeheer. Vanuit het watersysteembeheer werd niet alleen meer naar het voorkomen van wateroverlast en peilbeheer gekeken, maar werd ook begonnen met het aanleggen van bijvoorbeeld natuurvriendelijke oevers en het combineren van uitbreiding van de boezemberging met maatregelen voor waterkwaliteit. Hiermee werd naast het terugdringen van verontreiniging ook gekeken naar inrichting en beheer om de waterkwaliteit te verbeteren.

*Ecologie in het water als doelstelling*
In 2000 werd de Kaderrichtlijn Water (KRW) van kracht. Deze Europese wet gaf een nieuwe wending. Naast concrete kwaliteitseisen voor verontreinigende stoffen in het water kwamen er ook concrete doelen voor wat er in het water lééft. De KRW zorgde voor doelen voor de visstand, waterplanten, kleine waterdiertjes en algen, passend bij het type water en het gebruik ervan (bv vaarwegen, natuur, zwemwater). De KRW verplicht landen om vanaf 2010 ook concrete maatregelen in plannen op te nemen en deze uit te voeren. Deze moeten er toe leiden dat de gestelde doelen in 2027 worden bereikt. Bijvoorbeeld het verbeteren van de natuurvriendelijke inrichting en het herstellen van migratieroutes voor vis zijn hierdoor geen vrijblijvende opgaven meer.

Vanaf 2010 wordt gewerkt aan de uitvoering van de vastgestelde KRW-maatregelen voor ons gebied. Veelal zijn deze erop gericht de fysieke omstandigheden voor het leven in het water te verbeteren en de negatieve effecten van (vaak onomkeerbare) ingrepen zoals inpoldering, kanalisatie en vaste peilen te verzachten.

*Biodiversiteit*
De biodiversiteit staat onder druk. De laatste jaren is er veel aandacht gekomen voor de afnemende soortenrijkdom. Het water is een belangrijke drager voor biodiversiteit. Na een dieptepunt van de waterkwaliteit in de jaren ’70 en ’80, neemt met de verbetering van de waterkwaliteit ook de biodiversiteit in en om het water toe. In natuurvriendelijke oevers komen 50% meer soorten insecten en andere waterdiertjes voor dan in conventionele (steile) oevers.

*Huidige situatie*
De huidige waterkwaliteit in de boezem wordt verbeterd door de inlaat van IJsselmeerwater. Zonder waterinlaat wordt de kwaliteit van het boezem water bepaald door de kwaliteit van het water dat uit de polders, de vrij afstromende gebieden en de rioolwaterzuiveringen op de boezem komt. Dit water bevat veel voedingsstoffen en andere milieuvreemde stoffen. De Friese boezem is een groot en wijd vertakt systeem, wat vanuit de ecologische verbindingen bezien potentie heeft. Doordat de hele boezem hetzelfde peil heeft, is de migratie van vis en andere waterdieren mogelijk. Deze verbindingen zijn echter niet altijd zo ingericht dat de potentiële ecologische meerwaarde ook volledig gerealiseerd wordt. De kwaliteit van deze verbinding varieert sterk. In watersysteemanalyses is gebleken dat het gebrek aan habitatdiversiteit in veel watersystemen een knelpunt vormt voor een goede ecologische toestand door onder andere steile oevers (met beschoeiing) en de afwezigheid van een geleidelijke overgang van land naar dieper water.

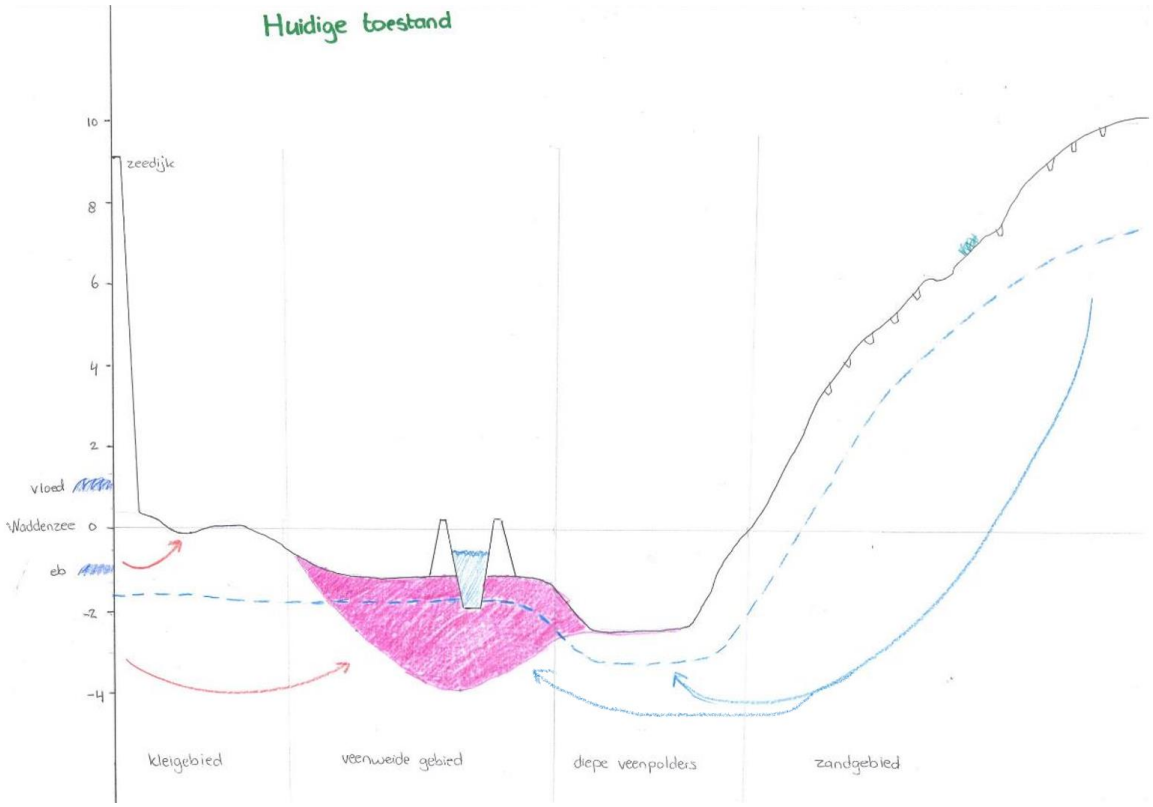
*Klimaatverandering*
De afgelopen tien jaar is de aandacht voor klimaatverandering sterk toegenomen en zijn we ook geconfronteerd met effecten die door klimaatverandering kunnen ontstaan zoals hitte, droogte en hoosbuien. Dergelijke effecten hebben een negatief effect op de waterkwaliteit en vragen om (ecologisch) robuuste watersystemen om dit op te vangen. Een goede waterkwaliteit is bijvoorbeeld juist van groot belang (denk aan zwemmen) in een hete zomer, terwijl de waterkwaliteit dan juist onder druk staat door bijvoorbeeld hoge watertemperaturen en overstorten door hoosbuien.

## Het functioneren van het grondwatersysteem

*Huidige situatie*

De maaiveldhoogte en de bodemopbouw van Fryslân hebben grote invloed op het functioneren van het huidige grondwatersysteem. In figuur 11 is een doorsnede van Fryslân weergegeven. De hoogte in m t.o.v. NAP is op schaal, de lengte as niet, die is wat “in elkaar gedrukt”. Vanaf de hoge zandgronden in het zuidoosten, het hoogste punt is ca. 10 meter boven NAP loopt het maaiveld af naar de diepe veenpolders, dit zijn de gebieden die in het verleden zijn verveend en daardoor heel laag liggen, zo’n 2 tot 2,5 meter onder NAP. Naast de diepe veenpolders ligt het veenweide gebied met een hoogte die varieert van 1,5 tot 0,5 meter onder NAP. In paars is het veenpakket dat nu nog aanwezig is aangegeven. Hier is ook een boezemvaart met keringen ingetekend. Ten westen van het veenweidegebied ligt het zeekleigebied met een hoogte die rond nul meter NAP ligt.

In de diepe ondergrond van Fryslân is het grondwater zout. Omdat het jaarlijks voldoende regent, ligt er een dikke laag zoet grondwater boven het zoute water. Deze laag zoet water is het grootst op de hoge zandgronden en het kleinst in de kustgebieden. Grondwater (voor een deel afkomstig uit Drenthe) stroomt via onze hoge zandgronden richting het lage midden van Fryslân. Hoe verder naar de kust, hoe dunner de laag zoet water wordt.




*Figuur 11: Doorsnede van Fryslân in de huidige situatie*

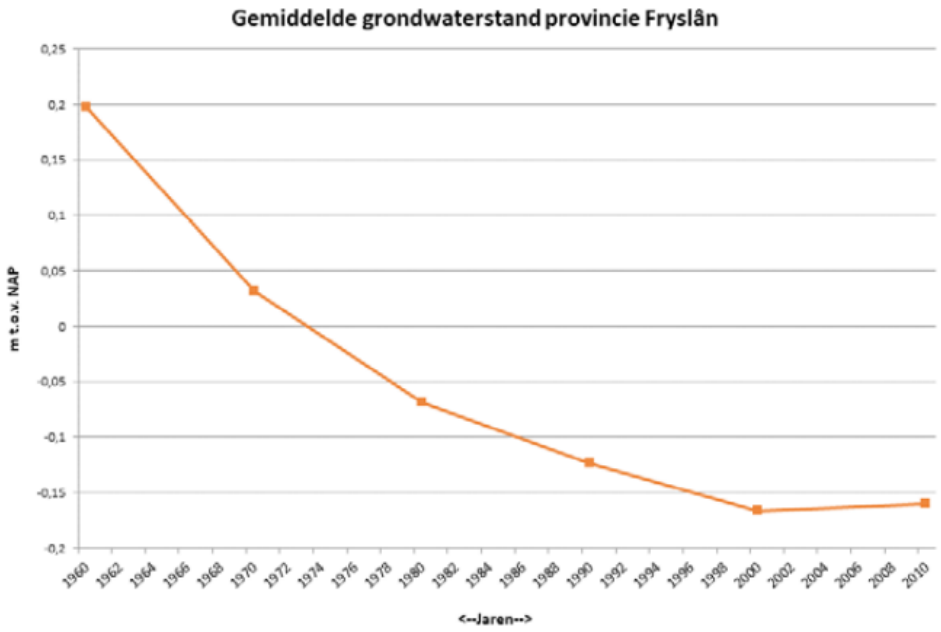
Met de blauwe stippellijn is de huidige grondwaterstand weergegeven. Onder de zandgronden is met een blauw pijl de stroming van het zoete grondwater aangegeven. Het zoete grondwater stroomt vanaf de zandgronden richting het laagste punt, de diepe veenpolders en de veengebieden. Onder het kleigebied is een kleine rode pijl getekend. Dit is de zoute kwel die onder de zeedijk door naar de lage delen en sloten van het kleigebied stroomt. Onder de kleine rode pijl is een grotere rode pijl getekend. Dit is het diepe zoute grondwater dat langzaam steeds verder Fryslân intrekt. Jaarlijks stroomt ongeveer 47 miljoen $m^3$ zout grondwater de provincie binnen.

Het Friese landschap is voor een groot deel ingericht als agrarisch gebied. De waterhuishouding is ook volledig afgestemd op een optimale landbouwpraktijk. De huidige inrichting van het watersysteem heeft tot gevolg dat in het veengebied veenoxidatie optreedt, waardoor het veen verdwijnt en het maaiveld steeds lager komt te liggen.

Het zoete grondwater vanuit de hoge zandgronden zorgde van oudsher voor tegendruk tegen het zoute grondwater. Door de intensieve ontwatering in het veengebied, oxideert het veen en daalt het maaiveld. Om de drooglegging te behouden wordt het peil verlaagd en oxideert het veen verder. Door deze maaivelddaling en de en de daaropvolgende peilverlagingen en daalde de grondwaterstand in het lage midden van Fryslân. Daardoor komt het zoete water nu al naar boven in de oostelijk gelegen diepe veenpolders. Voorheen kwam dat zoete water pas veel westelijker naar boven. De tegendruk tegen het zoute water is daardoor minder geworden en het zoute grondwater trekt daardoor steeds verder Fryslân in.

Door de diepe ligging van de oostelijke diepe veenpolders in Fryslân, wordt er harder “getrokken” aan het grondwater van de hoge zandgronden. Daar dalen de grondwaterstanden en in de diepe veenpolders voeren we een grote hoeveelheid grondwater af. Zo pompt bijvoorbeeld het Gemaal De Fjouwer Kriten in het veendistrict per jaar 41 miljoen m³ water naar de boezem. Daarvan is 16 miljoen m³ zoet grondwater dat vanaf de hoge zandgronden komt. Dit is een derde van de totale drinkwaterbehoefte van Fryslân.

Daarnaast infiltreert er minder neerslag in de bodem van de zandgronden, door de toename van ontwatering- en afwateringsmiddelen.  Door de betere ont- en afwatering en de toenemende kwel naar het veengebied dalen de grondwaterstanden in het zandgebied. Door de maaivelddaling in het veengebied en de verbeterde ontwatering van het kleigebied zijn de grondwaterstanden hier ook gedaald.



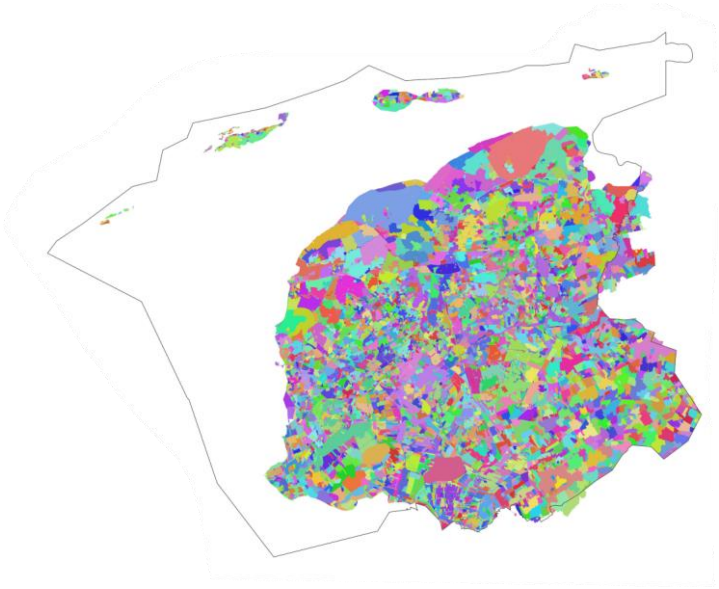

*Figuur 12: De gemiddelde grondwaterstand in Fryslân voor de periode 1960-2010 (bron: Grondwateratlas Fryslân)*

Om een beeld te krijgen van de grondwaterstandsdaling in Fryslân, zijn voor 42 lange meetreeksen van het grondwater in Fryslân per decennium gemiddelde waarden bepaald. Hierdoor ontstaat een beeld van de gemiddelde grondwaterstand van Fryslân in de afgelopen 60 jaar. De grafiek (figuur 12)

laat zien dat in Fryslân tussen de zestiger en negentiger jaren de grondwaterstanden gemiddeld zo'n 35 cm zijn gedaald. Daarna stabiliseerden de grondwaterstanden. Dit komt overeen met het beeld dat tot en met de jaren 90 via ruilverkavelingen en waterbeheersingsplannen op grote schaal peilverlagingen zijn doorgevoerd om een goede drooglegging voor landbouw te realiseren (Bron: Grondwateratlas Fryslân).

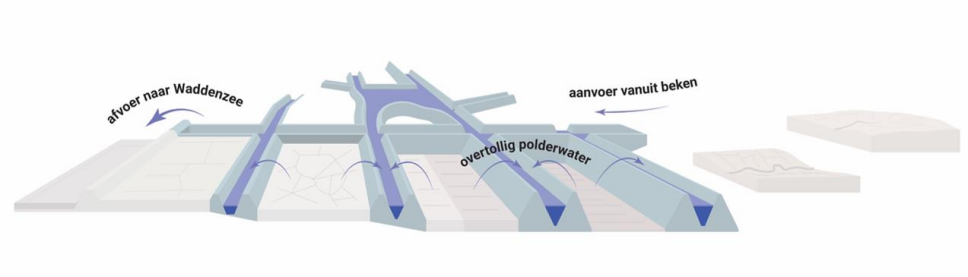
*Poldersystemen*
Het huidige Friese watersysteem bestaat uit ongeveer 900 poldersystemen met daarin ongeveer 8000 peilgebieden (zie figuur 13). Het Friese watersysteem is daarmee zeer fijnmazig gereguleerd en zeer goed afgestemd op verschillen in hoogteligging en de functies (landbouw, natuur en bebouwing). Voor het reguleren van het waterpeil in de polders heeft het waterschap ongeveer 1000 gemalen, ca. 5600 stuwen, 5500 inlaten en 5900 km hoofdwatergangen in beheer. Om de polders tegen het hogere boezempeil te beschermen heeft het waterschap ook nog ongeveer 5900 km waterkering. Door de fijnmazige inrichting is het beheer en onderhoud van het systeem erg kostbaar en arbeidsintensief.

Vrijwel alle poldersystemen wateren met een gemaal af op de Friese boezem. In het noorden liggen 3 grote poldersystemen, die rechtstreeks naar de Waddenzee of het Lauwersmeer afwateren. Dit zijn de zogenaamde afgekoppelde gebieden (zie figuur 6). Verder zijn er langs het IJsselmeer nog een paar kleine polders, die rechtstreeks afwateren op het IJsselmeer.



*Figuur 13: Kaart met peilvakken*

Als er veel regen valt voeren polders het teveel aan regenwater af via poldergemalen naar de boezem. Naast het overtollig water uit de polder komt er ook water via de beken op de boezem. Aan de randen van het boezemsysteem wordt vervolgens het teveel aan water afgevoerd via de spuisluizen en de gemalen naar de Waddenzee, het Lauwersmeer en het IJsselmeer. In figuur 14 is een schematische weergaven van het systeem weergegeven.

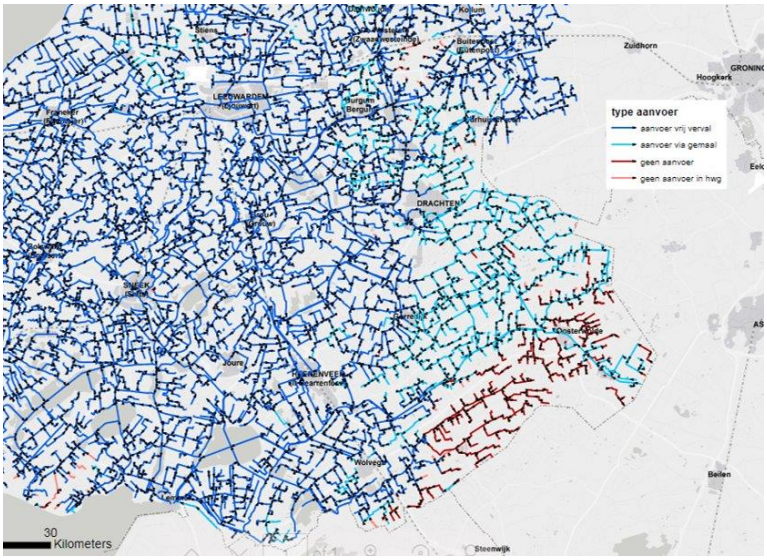



*Figuur 14: Schematische weergave van het Friese watersysteem (Bron: Werkboek verkenning BOVI Wetterskip Fryslân, H+N+S Landschapsarchitecten, 2021)*

Als het droog is dalen de waterstanden in de poldersystemen. Om dit te voorkomen wordt water aangevoerd vanuit de Friese boezem. Om de boezem op peil te houden wordt zoet water aangevoerd vanuit het IJsselmeer. In het grootste deel van de polders kan met behulp van duizenden inlaten water aangevoerd worden vanuit de boezem, omdat het waterpeil op de boezem hoger is dan in de poldersystemen. Dit betekent echter niet dat het zoete water overal even gemakkelijk kan komen. Soms liggen delen van de polder te hoog, waardoor het water er niet kan komen. In een aantal gevallen zijn binnen deze poldersystemen opmalingen aangelegd om het water naar de hogere delen te pompen. De gebieden waar geen wateraanvoer mogelijk is zijn afhankelijk van regenwater. Dit betekent dat in droge periode de waterstand hier uitzakt en sloten droog kunnen vallen.

*Beeksystemen en vrij afwaterende gebieden*

In de vrij afwaterende gebieden en in de beken ligt het waterpeil hoger dan de Friese boezem. Dit betekent dat voor de afvoer van het overtollige water geen gemalen nodig zijn, maar dat geen water aangevoerd kan worden zonder gemalen. In veel vrij afwaterende gebied wordt water aangevoerd met zogenaamde opmalingen. In een deel van de beekdalen is geen wateraanvoer mogelijk en een klein deel wordt gevoed met IJsselmeerwater dat via Drenthe met behulp van gemalen wordt opgepompt. In figuur 15 is een kaart opgenomen met de hoofdwatergangen waar wel of niet wateraanvoermogelijk is. In de rode hoofdwatergangen is geen wateraanvoer mogelijk. Deze watergangen worden alleen gevoed door regenwater en grondwater. In de licht blauwe watergangen is alleen wateraanvoer mogelijk via opmalingen en in de donkerblauwe gebieden kan water onder vrij verval worden ingelaten.




*Figuur 15: Kaart met de wateraanvoermogelijkheden per hoofdwatergang*

## De bodem van Fryslân

De bodem bestaat in Fryslân uit drie hoofdtypen, namelijk zand, veen en klei. De bodem is een belangrijke drager voor verschillende functies. Ook heeft de bodem een belangrijke functie voor het vasthouden van water. Voor deze functies is een gezonde bodem met een goed bodem(eco)systeem belangrijk. Bodems zijn gezond wanneer zij zich in een goede chemische, biologische en fysieke toestand bevinden. In het algemeen zijn bodems gezond in onbeheerde en natuurlijke ecosystemen maar kunnen ook in beheerde ecosystemen gezond worden gehouden door de toepassing van duurzaam bodembeheer. Dit vergroot de bodembiodiversiteit, de vruchtbaarheid en de veerkracht.

Een gezonde bodem zal Fryslân veerkrachtiger maken en de kwetsbaarheid voor klimaatverandering verminderen. Gezien de cruciale rol van de bodem in de waterkringloop is de bodem ook een onmisbare bondgenoot voor de aanpassing aan de klimaatverandering.

Het bodemecosysteem speelt een belangrijke rol in het transport van water en de omzetting van stoffen in de bodem. Dit betekent dat de bodemkwaliteit vanuit chemisch, biologisch en fysisch oogpunt met elkaar in evenwicht moet zijn. Een voorwaarde daarbij is dat het gebruik en bescherming van de bodem eveneens weer met elkaar in balans is. Dit betekent dat het niet meer vanzelfsprekend is dat de bodemfunctie ondergeschikt is aan specifieke bestemming in een gebied of regio. Gebiedsgericht zal dan ook gekeken moet worden naar de bodemfuncties in een betreffend gebied en de eisen rond ontwikkelingen die in een gebied in de toekomst plaats zullen vinden.

In de provincie Fryslân zijn trends waar te nemen waar de bodemfuncties onder druk staan dan wel in de nabije toekomst onder druk kunnen komen te staan. Dit zijn met name de verschraling van de hoge zandgronden, de verzilting in de kleigronden en de oxidatie van veengronden.

Om het waterbergend vermogen te verbeteren is het verhogen van het organische stofgehalte een belangrijke maatregel. Ook het voorkomen van bodemverdichting (kleigronden) en een gezond bodemecosysteem zijn belangrijk.

Om voldoende te kunnen anticiperen op de veerkracht van het oorspronkelijk water- en bodemsysteem is het doel om in te zetten op herstel, behoud en verbetering van het bodems in Fryslân.

Vanuit de provincie is de visie op bodem gericht op:

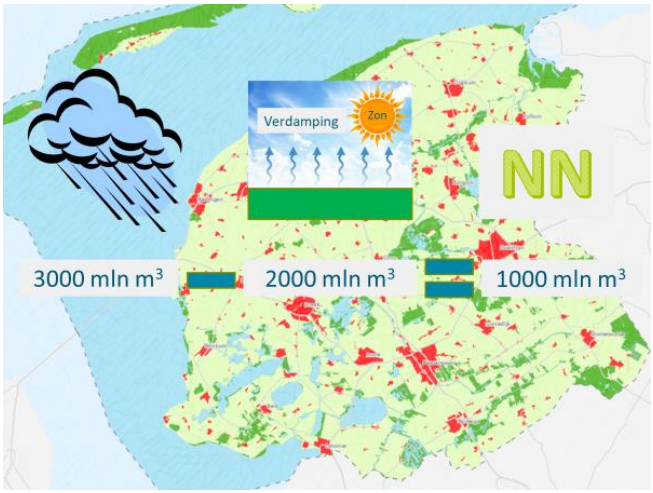
- Duurzaam en efficiënt bodembeheer gericht op gezonde en veilige leefomgeving;
- Vanuit ruimtelijke kwaliteit het bodem- en watersysteem als afwegingskader mee te nemen binnen de (maatschappelijke) opgaven;
- Bodemfuncties gebiedsgericht weer in balans met het bodemgebruik;

Op deze manier kunnen de bodemfuncties voor volgende generaties gewaarborgd blijven.

## De waterbalans van Fryslân

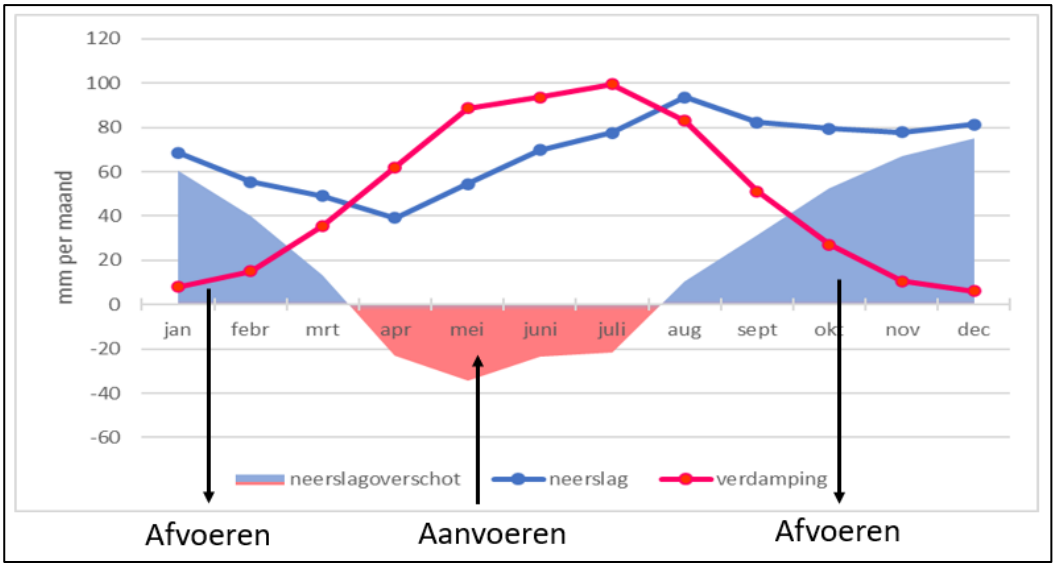
Fryslân is voor zoetwater afhankelijk van neerslag (grondwater) en het IJsselmeer. Neerslag is de belangrijkste bron van zoetwater. Jaarlijks valt er zo'n 3000 miljoen $m^3$ neerslag in Fryslân. Twee-derde van deze neerslag verdampt direct weer of wordt opgenomen door planten en verdampt vervolgens, waardoor het zorgt voor de groei van bomen en planten. Dit betekent dat jaarlijks ongeveer 1000 miljoen $m^3$ neerslag "over" is. Dit wordt de nuttige neerslag (NN) genoemd (zie figuur 16). Deze hoeveelheid zou meer dan genoeg moeten zijn om in de zoetwaterbehoefte (drinkwater en industriewater) van Fryslân te voorzien, echter een groot deel van dit overschot wordt direct weer afgevoerd via ons stelsel van sloten en vaarten naar de boezem en vervolgens via de boezem naar

het IJsselmeer, Lauwersmeer of Waddenzee. Als voorbeeld, op de zandgronden van Fryslân infiltreert slechts 15 % van de nuttige neerslag in bodem en komt ten goede aan de zoetwatervoorraad in de grond (grondwater).




*Figuur 16: Jaarbalans zoetwater voor Fryslân*

De zoetwaterbehoefte (voor o.a. peilhandhaving, natuur en landbouw) en de zoetwaterbeschikbaarheid is niet op elk moment in het jaar hetzelfde. In de winter valt er veel neerslag en is er weinig verdamping (zie figuur 17). De waterbehoefte van planten en bomen is dan laag. Het overtollige water wordt dan afgevoerd naar zee. In het voorjaar en de zomer valt er minder neerslag en is de verdamping hoog. De waterbehoefte van planten en bomen is dan juist groot. De neerslag is dan niet voldoende om in de zoetwaterbehoefte te voorzien. Om in de waterbehoefte te voorzien is de zoetwaterbeschikbaarheid in ons eigen systeem niet voldoende, omdat de het teveel aan neerslag in de winter is afgevoerd. Het tekort aan zoet water wordt vanuit het IJsselmeer aangevuld.




*Figuur 17: Gemiddelde neerslag, verdamping en neerslagoverschot per maand voor station Leeuwarden en de momenten van aan- en afvoer van water (bron: KNMI)*

In tijden van neerslagtekort is het IJsselmeer dus een belangrijke bron van zoet water voor het beheergebied van Wetterskip Fryslân. Het IJsselmeerwater dat wordt ingelaten wordt niet alleen gebruikt voor de waterbehoefte van Fryslân, maar wordt ook doorgevoerd naar Groningen en Drenthe.

## Drinkwaterwinning in Fryslân

De huidige verspreiding van drinkwaterwinningen uit grondwater is historisch gegroeid. De drinkwaterwinning bij Oldeholtpade werd in 1939 ontwikkeld, Spannenburg in 1940 en Appelscha (Terwisscha) volgde in 1960. Daarnaast zijn er nu drinkwaterwinningen in Oudega, Noardburgum, Garyp en Nij Beets. De drinkwatervoorziening op de Friese Waddeneilanden is in de jaren 50 van de vorige eeuw ontstaan. Elk Waddeneiland heeft een eigen winning, Ameland zelfs twee. De winning van grondwater voor de drinkwatervoorziening nam in de periode 1944 tot heden toe van bijna 7 miljoen $m^3$/per jaar tot meer dan 50 miljoen $m^3$/jaar.

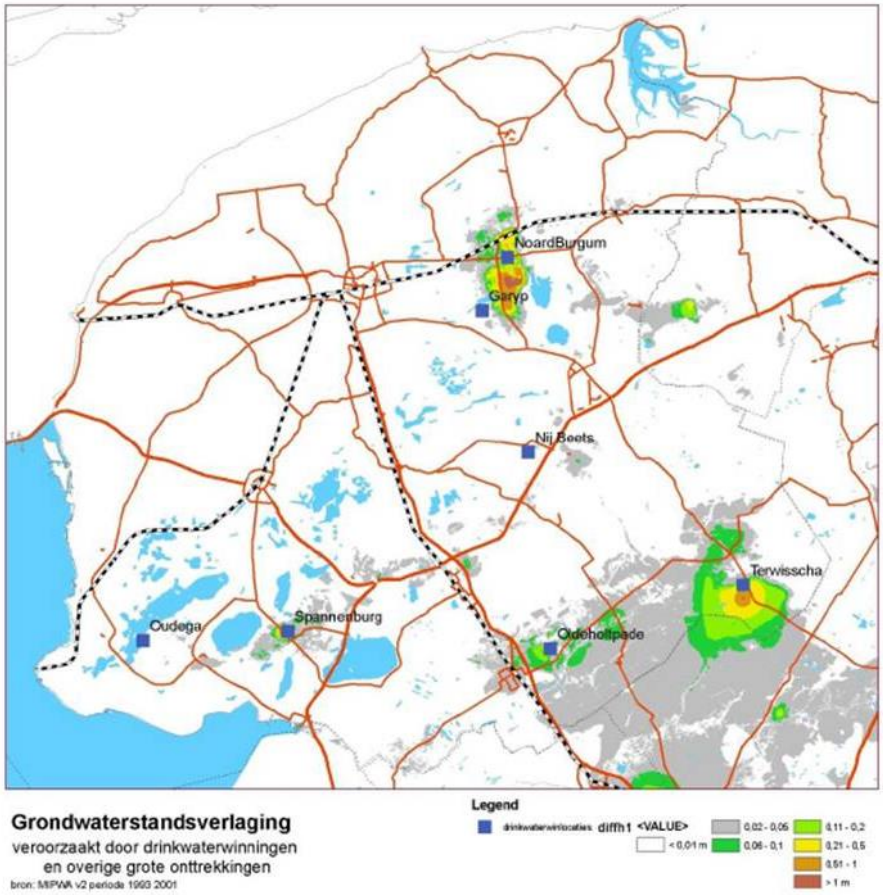
De huidige situatie van de drinkwatervoorziening kent in Fryslân:

- 53,5 miljoen $m^3$ onttrekking per jaar (2019);
- 12 grondwaterwinningen (waarvan 5 op de Friese Waddeneilanden);
- Circa 8100 km transportleidingen waaronder twee Wadleidingen (naar Ameland en Terschelling).

In bijlage 1 is een kaart opgenomen met de ligging van de winningen en transportleidingen.

De invloed van de drinkwaterwinningen wordt niet alleen bepaald door de onttrekkingshoeveelheid, maar ook door de ligging van de winning. Op de kaart in figuur 18 is te zien dat de winningen in de infiltratiegebieden op de hoge zandgronden (Terwisscha, Oldeholtpade en Noardburgum) het grootste effect hebben op de grondwaterstanden in de omgeving. Je ziet hier een grote grondwaterstandsverlaging en een groot invloedsgebied. Het water zakt hier van nature al diep weg (water stroomt van hoog naar laag) en door de winning wordt de grondwaterstand dan extra verlaagd. Bij Oldeholtpade wordt extra water aangevoerd, ter compensatie van de invloed van de drinkwaterwinning. Drinkwaterwinningen die lager in het systeem liggen, hebben minder invloed. Zij vangen de kwelstromen vanaf hogere gronden die hier omhoog komen af en hebben daardoor een minder verlagend effect. Voorbeelden hiervan zijn Garyp, Nij Beets en Spannenburg. De winning van Oudega heeft ook een klein invloedsgebied, deze winning ligt ook laag in het systeem, maar de aanwezigheid van de Fluessen (groot boezemoppervlak) heeft hier ook een positieve invloed op.

De grondwaterwinning Terwisscha ligt in Natura 2000-gebied en Nationaal Park Drents-Friese Wold nabij Appelscha. Bekend is dat deze winning een verlaging van de grondwaterstand veroorzaakt en daarmee verdroging van de grondwaterafhankelijke natuur in dit gebied. Samen met provincie Drenthe is er om die reden een bestuurlijke afspraak ondertekend om de winning Terwisscha terug te brengen van 7,5 naar 3,25 miljoen $m^3$/jaar. Een deel van deze drinkwaterreductie moet worden opgevangen door het ontwikkelen van een nieuwe grondwaterwinning. Hiervoor vinden voorbereidingen plaats nabij het dorpje Luxwoude (zie ligging in bijlage 1). Deze locatie ligt lager in het systeem en heeft daardoor ook minder negatieve invloed op de grondwaterstanden. Daarnaast werkt Vitens aan het ontwikkelen van een nieuwe winlocatie nabij de huidige drinkwaterwinning Nij Beets. Tenslotte wordt ook gewerkt aan een levering van jaarlijks 3 miljoen $m^3$/jaar vanuit de provincie Drenthe.




*Figuur 18: Invloed drinkwaterwinningen op de grondwaterstand*

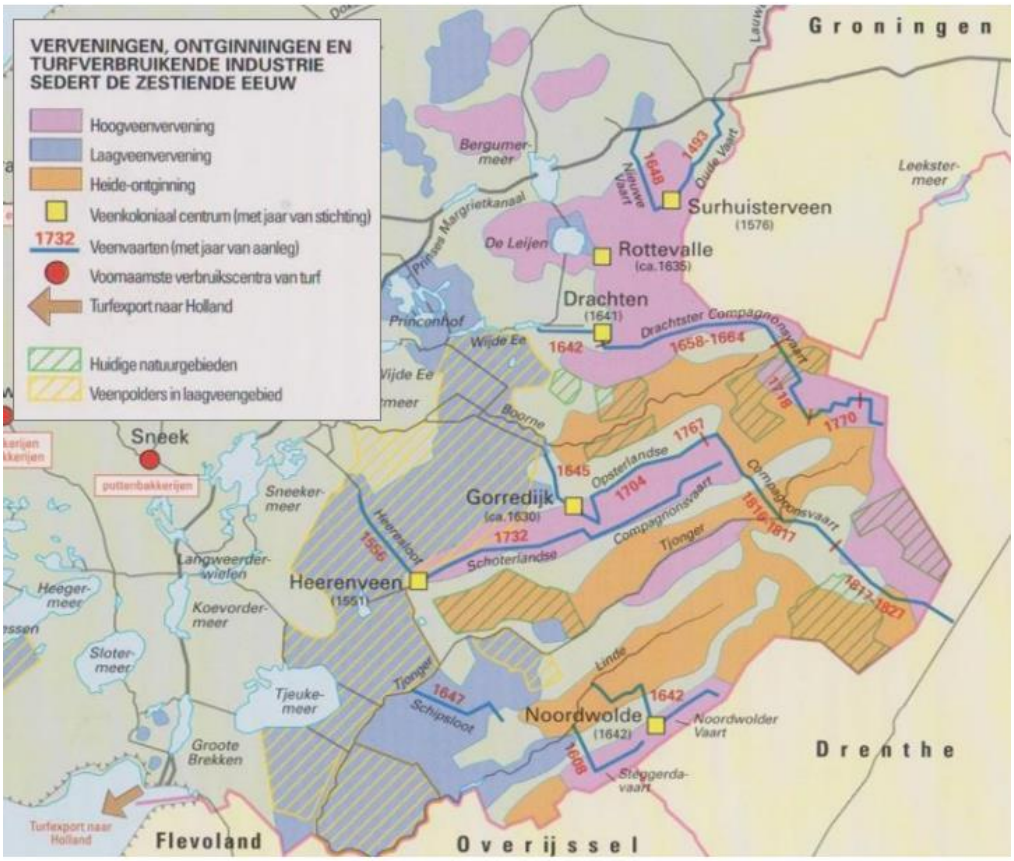
### Bebouwd gebied

Het water- en bodemsysteem van de bebouwd gebied is anders dan dat van het platteland. Er is een grotere hoeveelheid verhard oppervlak (huizen en straten) die zorgen voor een versnelde afvoer van regen naar een rioolstelsel of het oppervlaktewater. Het rioolstelsel voert het water af naar de rioolwaterzuivering. Bij veel neerslag kan niet al het water naar de zuivering worden afgevoerd. Een deel van het water wordt dan tijdelijk geborgen in bassins of het wordt via overstorten afgevoerd naar het oppervlaktewater. Dit heeft dan wel gevolgen voor de waterkwaliteit van dat oppervlakte water. Bij extreme neerslag kan niet alle het water snel genoeg via het rioolstelsel worden afgevoerd. Er komt dan water op straat te staan. Dit zorgt voor wateroverlast.

## 2.2. Zand

De zandgronden op het vaste land van Fryslân zijn afkomstig uit het Pleistoceen. In deze periode zijn zes ijstijden geweest. De laatste twee ijstijden zijn voor het ontstaan van de zandgronden in Fryslân van betekenis geweest. Een stelsel van gletsjers en gletsjertongen hebben de brede beekdalen van de Boorne, de Tsjonger en de Lende gevormd. In het Saalien (200.000 – 125.000 jaar geleden) is de provincie volledig bedekt geweest met een meters dikke ijslaag. Het ijs rukte op vanuit het noordoosten en rivieren vanuit Duitsland moesten daardoor het water via Noord-Nederland afvoeren. Dikke pakketten met wit zand werden in Fryslân afgezet. De volledige bedekking van Fryslân met ijs heeft voor het landschap veel gebracht. Het voorkomen van het reliëf en keileem is hier aan te danken. In de laatste ijstijd, het Weichselien (80.000 – 10.000 jaar geleden), is Fryslân niet meer met ijs bedekt geweest. Het was wel koud en er waaide een harde wind. Heel Fryslân werd bedekt met een laag dekzand, soms wel meters dik.

Later vormde zich door natte omstandigheden (kwel en stagnerend regenwater) vanuit de beekdalen laagvenen en later hoogvenen op de zandgronden. Vanaf de 15e eeuw werden deze veengebieden ontgonnen. Bij de ontginning van de hoog- en laagvenen zijn vaarten aangelegd, die soms de beekdalen doorkruisen, zie figuur 19. Dit heeft grote impact gehad op het natuurlijke watersysteem van de zandgronden.




*Figuur 19: Uitsnede van Overzicht ontwikkeling verveningen, veldontginningen en aanleg van vaarten in Fryslân (bron: 'De wereld van het Friese landschap' door M. Schroor, 1993)*

Het zandgebied van Fryslân heeft een oppervlakte van circa 80.000 hectare en ligt boven NAP . In het beekdalengebied van zuidoost Fryslân liggen dekzandruggen, parallel aan de van noordoost naar zuidwest lopende beekdalen. Op de dekzandruggen liggen grotere landbouwgebieden afgewisseld door heide- en bosgebieden, als ook voormalige hoogvenen zoals het Fochterloërveen.

De hoogste delen van het zandgebied liggen in de omgeving van Appelscha met een hoogte van ruim 20 meter boven NAP. Het zandgebied kan vooral worden gekenmerkt als infiltratiegebied. Een uitzondering hierop vormen de beekdalen, hier is sprake van kwel. Jaarlijks infiltreert er netto ruim 50 miljoen $m^3$ grondwater naar de diepere ondergrond. Dit grondwater stroomt vervolgens grotendeels richting het lager gelegen Friese veenweidegebied en de diepe veenpolders. Op verschillende plaatsen in het zandgebied is op geringe diepte een slecht doorlatende keileemlaag aanwezig. Vooral gebieden met (ondiepe) keileem kunnen in de herfst/winter behoorlijk nat zijn. Maar in de zomer zakt nagenoeg overal in het zandgebied de grondwaterstand vaak diep weg (Bron: Grondwateratlas Fryslân).

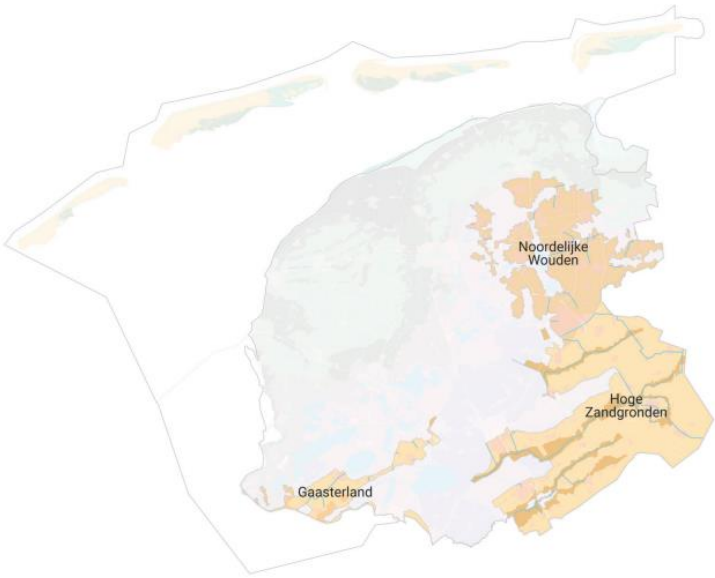
Intensieve grondbewerking en gebruik van kunstmest heeft geleid tot afname van het organisch stofgehalte van de zandgronden, met verschraling van bodem en bodemleven tot gevolg.  Intensieve

mechanische grondbewerking heeft geleid tot verdichting van de bodems en daardoor vermindering van de doorlatendheid/infiltratie van de bodem.

De zandgronden zijn gevoelig voor droogte, om verschillende redenen:

- Zandgronden kunnen niet veel water vasthouden;
- Het watersysteem is zo ingericht dat water snel wordt afgevoerd, slechts 15 % van het neerslagoverschot (nuttige neerslag) infiltreert;
- Door intensieve ontwatering en lage peilen worden in de winter grondwaterstanden kunstmatig laag gehouden en is er geen zoetwaterbuffer voor het voorjaar en de zomer;
- Het opgevoerde water vanuit het IJsselmeer bereikt lang niet alle delen van het zandgebied en heeft maar een beperkte invloed op het grondwater.

Voor de zandgebieden van Fryslân onderscheiden we de hoge zandgronden in het zuidoosten, de Noardlike Fryske Wâlden (Noordelijke Wouden) en Gaasterland, zie figuur 20.

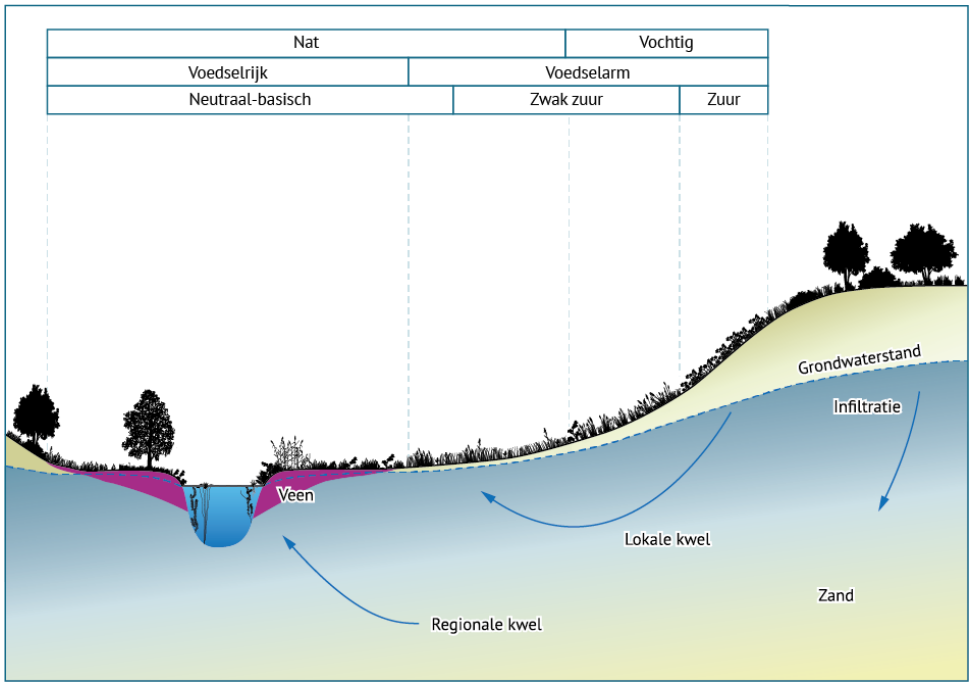



*Figuur 20: Zandgronden van Fryslân (Bron: Werkboek verkenning BOVI Wetterskip Fryslân, H+N+S Landschapsarchitecten, 2021)*

## Hoge Zandgronden

In Fryslân liggen verschillende beekdalen. Drie belangrijke beekdalen in Fryslân zijn (van zuid naar noord) De Lende, De Tsjonger en Alddjip (Koningsdiep). De stroomrichting van alle drie beken is globaal van oost naar west. De beekdalen vormen een bijzonder element binnen het zandgebied van Fryslân. Door de aanwezigheid van kwel hebben zich op een aantal plekken bijzondere, grondwaterafhankelijke vegetaties ontwikkeld. Deze kwel in de laatste decennia flink afgenomen door menselijk ingrijpen in het landschap en het watersysteem. Ondanks dat de stroming niet hoog is, vallen de Tsjonger, Lende en het Alddjip onder de stromende wateren als het gaat om typering voor de Kaderrichtlijn Water (KRW). In een natuurlijk functionerend beeksysteem is er sprake van een grote verscheidenheid aan gradiënten, leidend tot hoge biodiversiteit. De hoogtegradiënten zorgen voor de toestroming van grondwater naar de beek. Tijdens deze stroming door de bodem worden stoffen opgenomen in het grondwater. Van flank naar beekdal komen verschillende gradiënten voor: van droog naar nat, van voedselarm naar voedselrijk en van zuur water naar neutraal water (zie figuur 21). In de huidige situatie zijn veel van deze gradiënten verdwenen. De landschappen worden over grote oppervlakten intensief gebruikt. Sloten zorgen voor een snelle

afvoer, waardoor minder water infiltreert naar het grondwater. De beken zelf zijn grotendeels gekanaliseerd, doorsneden door turfvaarten of gedimensioneerd op de afvoer van water.




*Figuur 21: Dwarsdoornede van het beekdal (Bron: o+bnNatuurkennis)*

Door de diepe ontwatering van het intrekgebied en de flanken van de beekdalen wordt het water snel afgevoerd naar de beek. Het water krijgt niet de kans om te infiltreren naar het grondwater. Hierdoor liggen de grondwaterstanden in de zomer lager dan de beekbodem en voeren de beken in de zomer geen grondwater meer af. Er is dus niet of nauwelijks kwel meer langs de beek. Het gebrek aan kwel in de zones langs de beek en het droogvallen van de beek in de zomer heeft grote impact op de biodiversiteit.

Uit monitoring blijkt dat er, ondanks alle aanpassingen, nog steeds soorten van stromend water voorkomen. Deze systemen hebben daarom een bijzondere positie in het beschermen en verbeteren van de Friese biodiversiteit.

In het beekdal van De Lende en het Alddjip zijn in de gebiedsontwikkelingen de laatste jaren al veel herstelmaatregelen uitgevoerd. Maatregelen als hermeandering, aanleg van bergingsgebieden en ontpoldering hebben weer een meer natuurlijk beeksysteem terug gebracht. Voor De Tsjonger is nog geen gebiedsontwikkeling opgestart.

### Noardlike Fryske Walden

Het Noordelijk Wouden gebied ligt tussen Dokkum en Drachten. Het wordt gevormd door de noordwestelijke uitloper van de hogere zandgronden van het Drents Plateau en bestaat uit een aantal grote en kleine zandopduikingen (hoge delen met een maaiveldhoogte van enkele meters boven NAP), afgewisseld door lage (-1 tot 0 m NAP), veelal met veen opgevulde gebieden, de “mieden”. Door de ontginning van de het veen in de Middeleeuwen is een karakteristieke landschap, het zogenaamde coulisselandschap, ontstaan van smalle, lange percelen. Langs de randen van deze percelen liggen elzensingels of houtwallen.  In het gebied liggen ook heel veel pingoruïnes.

Verder ligt in het gebied een brede lage slenk, met daarin de meren van het Burgumermar en De Leien. De Noordelijk Wouden onderscheidt zich van de andere beekdalsystemen (De Tsjonger, De

Lende en Alddjip) door de afstromingsrichting, waarbij het grondwater vanaf de hogere zandkoppen naar de lagere veengronden stroomt. In deze lagere veengronden liggen natuurgebieden als de Twijzelermieden en de Zwagermieden. Door de intensieve ontwatering en de drinkwaterwinning in Noardburgum is de kwelstroom naar de lager gelegen “mieden” wel afgenomen.

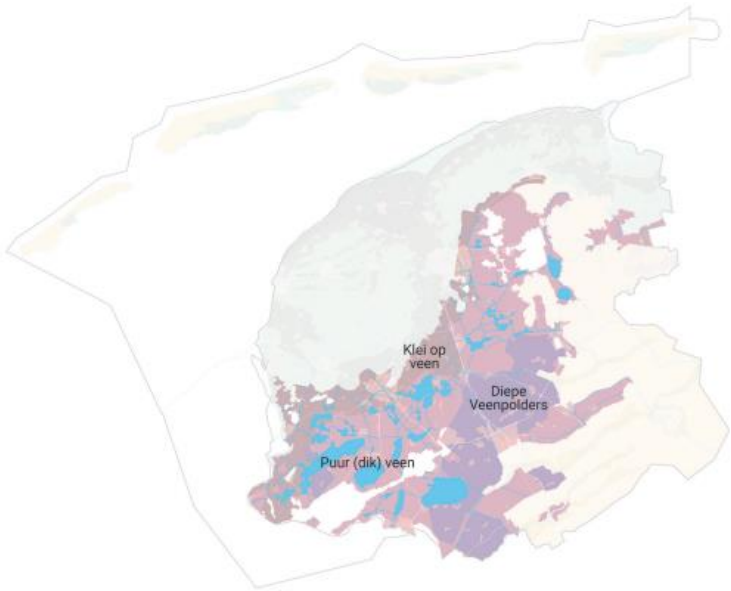
### Gaasterland

Gaasterland ligt in het zuidwesten van Fryslân. Het is een stuwwallandschap met een “kliffenkust” langs het IJsselmeer. De streek is glooiend en bosrijk. Deze reliëfs heetten vroeger gaasten. Het zijn in de Saalien-ijstijd opgestuwde keileemruggen, overdekt met een laag zand. De keileemlaag ligt dicht aan de oppervlakte en zorgt ervoor dat regenwater niet diep de grond in kan zakken, maar oppervlakkig (ondiep) afstroomt naar de lage delen.

Door inpoldering van de Noordoostpolder, de realisatie en uitbreiding van de grondwaterwinning van Spannenburg en meerdere peilveranderingen in de omgeving is het grondwatersysteem hier flink veranderd. In de huidige situatie vindt nog steeds infiltratie plaats op genoemde stuwwallen, maar de kwel rondom deze stuwwallen is veelal verdwenen doordat het geïnfiltreerde water grotendeels opgenomen wordt in de diepe grondwaterstroming richting de Noordoostpolder en – meer lokaal – naar de grondwaterwinningen van Spannenburg en Oudega.

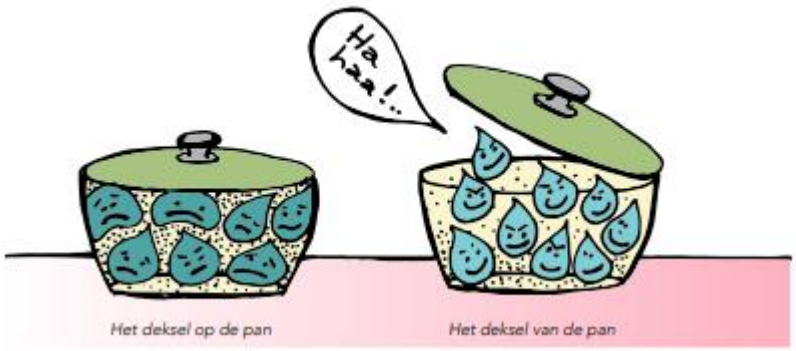
## 2.3. Veen

Het veenweidelandschap van onze provincie heeft een lange geschiedenis van veenafgravingen en inpoldering. Het gebied werd in cultuur gebracht en is nu een gevarieerd landschap van weilanden, meren, sloten en vaarten. Het Friese veenweidegebied is ongeveer 89.000 hectare groot en ligt in het lage midden van Fryslân, ruwweg tussen Dokkum, Sneek, Workum, Lemmer en Wolvega. Het is het grootste aaneengesloten veenweidegebied van Nederland. Zo’n 52.000 hectare ervan is in gebruik als agrarische grond. Daarnaast bestaat een belangrijk deel van het veengebied uit natuurgebied. Van de in totaal 15.000 hectare natuurgebied bestaat een kleine 10.000 hectare uit laagveenmoerassen, zoals De Alde Feanen, De Deelen en De Rottige Meente. Typerend voor het veenweidelandschap zijn de hoogwatersloten langs bebouwing om de funderingen ervan nat te houden en verzakking door paalrot te voorkomen. Binnen het veenweidegebied onderscheiden we drie deelgebieden: de diepe veenpolders, puur (dik) veen en klei-op-veen (zie figuur 22).




*Figuur 22: Veengronden van Fryslân (Bron: Werkboek verkenning BOVI Wetterskip Fryslân, H+N+S Landschapsarchitecten, 2021)*

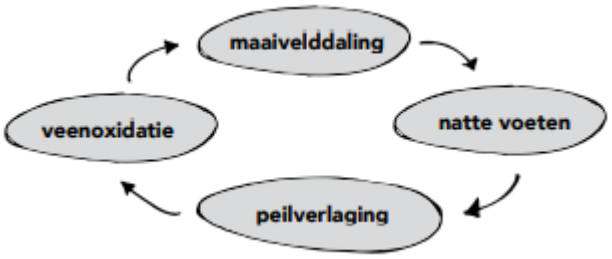
Het Friese veenweidegebied ligt momenteel ongeveer 1 tot 3 meter onder NAP. Het veengebied ligt daarmee meters lager dan het oostelijk gelegen zandgebied van Fryslân. Het veengebied ligt ook lager dan het noord(west)elijk gelegen zeekleigebied. Daardoor stroomt nu ook grondwater vanuit het noordwesten richting het lage midden van onze provincie. Jaarlijks stroomt ongeveer zo'n 72 miljoen m³ grondwater naar het veengebied. Veen is slecht doorlatend. Daardoor biedt het veen weerstand tegen grondwaterstromingen van onderaf. Veen is als het ware 'de deksel op de pan'. De veenlaag wordt dunner door oxidatie en kan op termijn zelfs verdwijnen. Daarmee verdwijnt de deksel op de pan (zie figuur 23) . Het diepere grondwater ondervindt daardoor minder weerstand om naar boven te stromen. Dat wordt versterkt door het bemalen van overgebleven dunne veengronden of moerige gronden in de diepe veenpolders.




*Figuur 23: Verdwijnen weerstand van de veenlaag (Bron: Grondwateratlas Fryslân)*

Het veengebied bestaat uit verschillende bodemtypen. In het midden liggen de zogenaamde pure veenbodems. Dit zijn veenbodems zonder kleidek. Binnen de pure veenbodems wordt onderscheid gemaakt in dik veen waar het veen dikker is dan 80 cm en het dunnere veen met een dikte tussen de 40 en 80 cm. Meer westelijk en in het uiterste noordwesten van het Friese veenweidegebied liggen de klei-op-veenbodems. Hier is door overstroming met zeewater een kleidek afgezet. De veendiktes variëren van 0,4 tot 2,5 meter in het oosten tot enkele meters in westen. Onder het veen bevindt zich meestal een dunne zandlaag en daaronder ligt een leemlaag (keileem). In het algemeen zijn de polderpeilen in het Friese veenweidegebied relatief laag. Conform de Veenweidevisie wordt een maximale drooglegging van 90 cm gehanteerd. De grondwaterstand volgt deze lage polderpeilen waardoor het veen droog komt te staan en wordt afgebroken (oxidatie en inklinking). Als gevolg hiervan daalt de bodem. De pure veenbodems zonder beschermend kleidek dalen het snelst met meer dan 1 cm per jaar. De klei-op-veenbodems dalen iets minder snel met minder dan 1 cm per jaar.

Om deze bodemdaling te compenseren worden de polderpeilen na verloop van tijd weer naar beneden bijgesteld waarmee ook de grondwaterstand verder wordt verlaagd en het veen verder inklinkt en het maaiveld weer daalt. Dat is een proces wat almaar verder gaat, zie figuur 24




*Figuur 24: Cyclisch proces van bodemdaling en peilaanpassing in het veengebied*

## Diepe veenpolders

De diepe veenpolders liggen aan de oostzijde van het lage midden in een strook langs de overgangszone naar het zandgebied. De diepe veenpolders zijn ontstaan doordat het veen voor turfwinning is afgegraven. Vervolgens ontstonden hier moerassen, die later zijn drooggemalen voor landbouwgrond. Ze vormen een laaggelegen gebied (1,5 tot 3 m onder NAP) met nog een dunne laag veen (40-80 cm) of moerige grond op de zand-/ keileembodem.

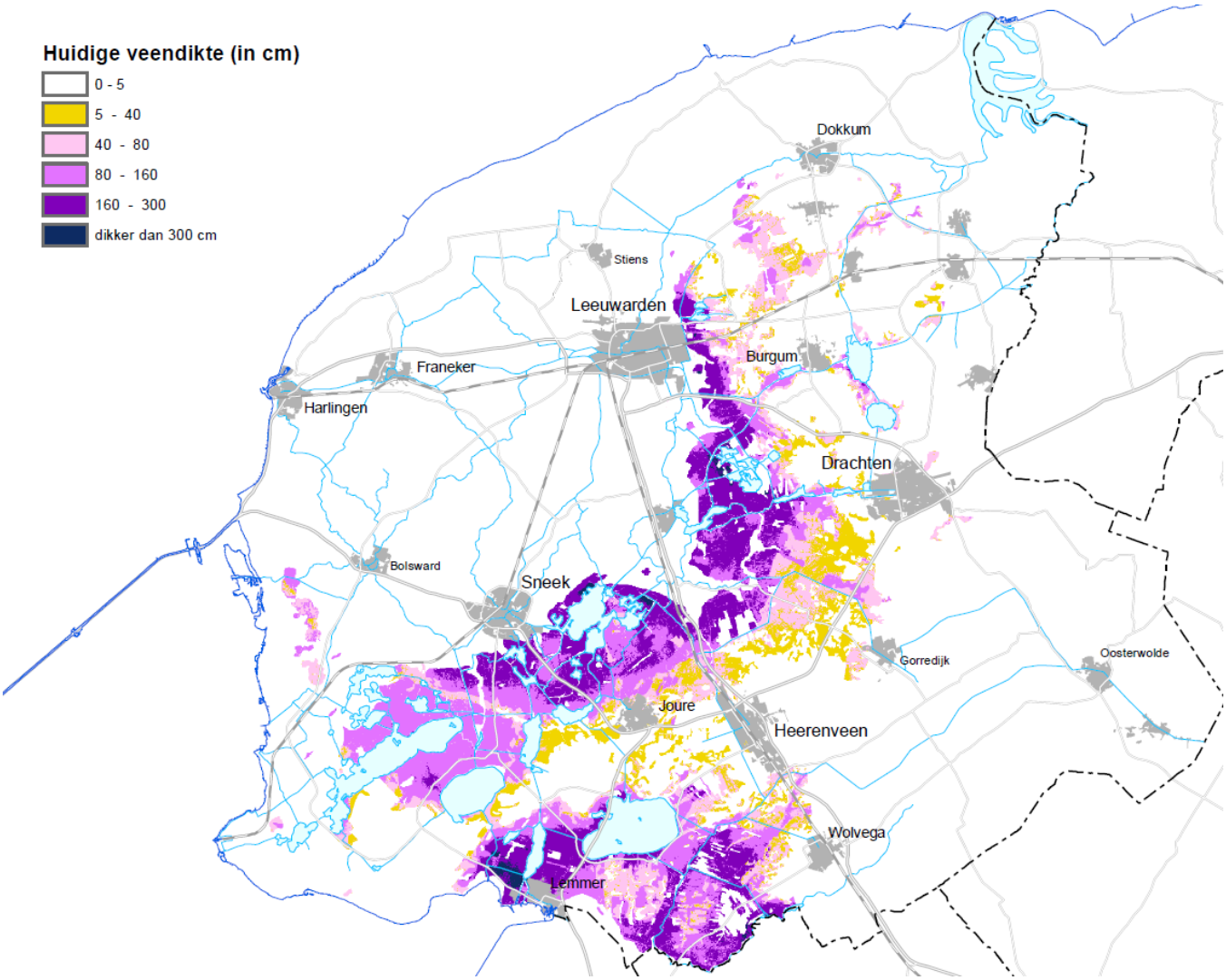
Door de lage ligging is er vanuit de omliggende gebieden een grote grondwaterstroom richting de diepe veenpolders. Het overgrote deel (80%) komt vanuit de hoge zandgronden. De weerstand biedende veenlaag is in de diepe veenpolders uiterst dun of verdwenen. Daardoor bestaat 40% van het water dat de gemalen afvoeren in de diepe veenpolders uit grondwater. Het grondwater wat in het oppervlaktewater terecht komt kan zorgen voor bijzondere natuurwaarden zoals de kwel-indicerende soorten waterplanten Waterviolier en Holpijp.

Natuurgebieden zoals De Deelen en de Rottige Meente liggen nu hoger dan de omringende polder, omdat in de natuurgebieden niet al het veen is afgegraven en de waterstanden veel hoger zijn ten opzichte van maaiveld, waardoor het maaiveld minder is gedaald door oxidatie.

Dit heeft tot gevolg dat deze natuurgebieden water verliezen naar de omliggende polder in plaats van water ontvangen vanuit het zandgebied. Voor het behoud van de natuurwaarde is de kwel vanaf de zandgronden heel belangrijk.

## Puur (dik) veen

Ten westen van de diepe veenpolders ligt het veengebied met een dikke veenlaag (tot enkele meters). De hoogteligging is gemiddeld 1,0 m onder NAP. De dikste veenpakketten liggen rondom de Alde Feanen, het Snitser Mar en langs de Grutte Brekken ten noorden van Lemmer. Hier komen veendiktes voor van soms wel 4 meter (zie figuur 25).




*Figuur 25: Huidige veendikte (2014) in Fryslân (Bron:Veenweideprogramma 2021-2030, Achtergronddocument)*

Als gevolg van de drooglegging voor de landbouw is in dit gebied sprake van een forse maaivelddaling met meer dan 1 cm per jaar door oxidatie van het veen. Bij de afbraak (oxidatie) van veen komt het broeikasgas koolstofdioxide vrij. Daarnaast komen er broeikasgassen vrij uit oppervlaktewater.

## Klei op veen

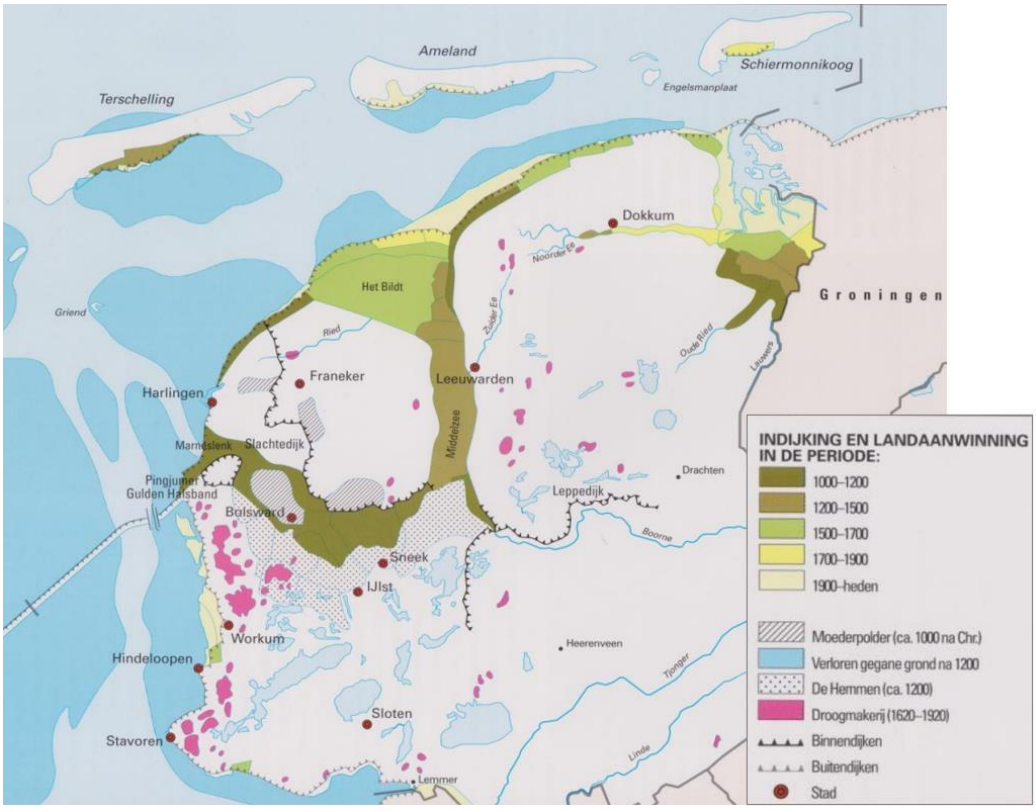
In het noordwesten van het veengebied ligt het klei-op-veen gebied. Dit gebied is ongeveer 8300 ha groot. De bodem bestaat uit veengronden met een kleidek van maximaal 40 cm dik. De maaiveldhoogte ligt ongeveer rond 1 m onder NAP. Door de aanwezigheid van een kleidek is de draagkracht groter dan in de pure veengebieden. De gebieden zijn over het algemeen ook diep ontwatert, waardoor het veen onder het kleidek ook boven de freatische grondwaterstand ligt en ook hier maaivelddalling door de oxidatie van het veen optreedt. De maaivelddaling verloopt langzamer, minder dan 1 cm per jaar dan in de pure veengronden. Dit komt omdat de kleilaag het veen afdekt en er zo minder veenoxidatie plaats vindt. Ook hier liggen hoogwatercircuits langs de bebouwde delen van het gebied.

De kleilaag zorgt voor andere groeiomstandigheden voor oever- en waterplanten. Afspoeling van stoffen naar het oppervlaktewater vindt op kleibodems meer plaats dan op puur veen- en zandbodems waardoor het oppervlaktewater meer belast wordt met nutriënten en

bestrijdingsmiddelen (indien die worden gebruikt). De achtergrondbelasting van oppervlaktewateren met nutriënten vanuit de bodem is ook hoger op kleibodems omdat deze bodems van nature rijk zijn aan nutriënten.

## 2.4. Klei

Het zeekleigebied in het noordwesten en noorden van Fryslân heeft een oppervlakte van ruim 135.000 hectare. Zoals de naam al aangeeft is het noordelijk zeekleigebied gevormd door de zee. Voordat het kleigebied in de (late) middeleeuwen werd bedijkt bestond dit deel van Fryslân uit een uitgestrekt kwelderlandschap met kwelderruggen, terpen en slenken. Deze structuren zijn in het huidige landschap nog goed herkenbaar. Bij hoogwater werd een laagje slib door de zee afgezet. Zo groeide de kleilaag in dit gebied en werd het gebied steeds hoger. Het groeide als het ware mee met de zeespiegelstijging. De oude Middelzee, van noord naar zuid, ten westen van Leeuwarden, is nog goed herkenbaar in het landschap. Tussen Harlingen en Bolsward is de Marneslenk nog duidelijk herkenbaar in het landschap. Bij Bolsward was de Middelzee verbonden met de Marneslenk. Rond het jaar 1100 werd deze verbinding verbroken en begonnen de slenken dicht te slibben en werd de Middelzee steeds verder ingepolderd (zie figuur 26). Door de bedijking (vanaf circa 1000 na Chr.) is het proces van meegroeien met de zee gestopt. Door rijping en klink is de bodem zelfs gedaald. Doordat de zee het land niet meer overstroomt kan het bovenste deel van het grondwater verzoeten onder invloed van regenwater. Maar er is nog altijd op enkele meters diepte zout grondwater aanwezig. Op dit zoute grondwater heeft zich een dunne zoetwaterlens ontwikkeld.

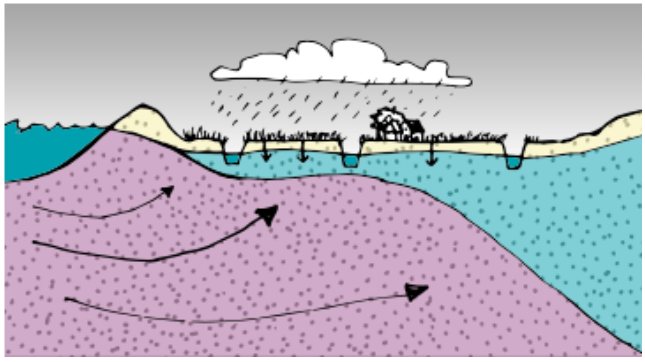



*Figuur 26: Overzicht bedijkingen in Fryslân (bron: 'De wereld van het Friese Landschap, M. Schroor, 1993)*

Tijdens de ruilverkavelingen in de tweede helft van de vorige eeuw is de ontwatering en de afwatering van het gebied ten behoeve van landbouw verbetert door peilverlaging en de bouw van gemalen. Voor deze grootschalige ruilverkavelingen lagen grote delen van het gebied nog rechtstreeks voor de boezem. De drooglegging is in de akkerbouwgebieden erg groot. Op de hoge delen vaak veel groter dan 1,2 m. In de graslandgebieden is de drooglegging kleiner dan in de

akkerbouwgebieden, maar ook hier is de drooglegging in de hoogste delen van het gebied veel groter dan 1 m.

Vanuit de Waddenzee stroomt jaarlijks ongeveer 47 miljoen m³ grondwater onder de zeedijk door naar het zeekleigebied van Fryslân. Dit komt, omdat de grondwaterstanden binnendijks lager zijn dan het zeenniveau en het lage midden van Fryslân een groot deel van het zoete water van de zandgronden afvangt waardoor de grondwaterstroming vanaf de zandgronden niet meer tot het kleigebied komt. Een deel van dit zoute grondwater stroomt door richting het Friese veenweidegebied. In het zeekleigebied komt het zoute grondwater als zoute kwel naar boven, zie figuur 27. Een groot deel van het zoute kwelwater stroomt naar de drainage en de sloten in het gebied. Door de peilverlagingen, voortgekomen uit de ruilverkavelingen, is de kwel van zout grondwater richting de sloten toegenomen. Dit leidt tot verzilting van het oppervlaktewater. Bodemdaling als gevolg van delfstoffenwinning (gas en zout) en de daarop volgende peilverlagingen versterken het verziltingsproces. Daarnaast zorgen de intensieve ontwatering en lage peilen ervoor dat zoet water snel wordt afgevoerd, waardoor de vorming van een zoetwaterlens wordt beperkt. De dikte van de zoetwaterlens is niet overal in het gebied hetzelfde. In de hoger gelegen delen zijn de oppervlaktewaterpeilen hoger, waardoor een dikkere zoetwaterlens kan ontstaan.

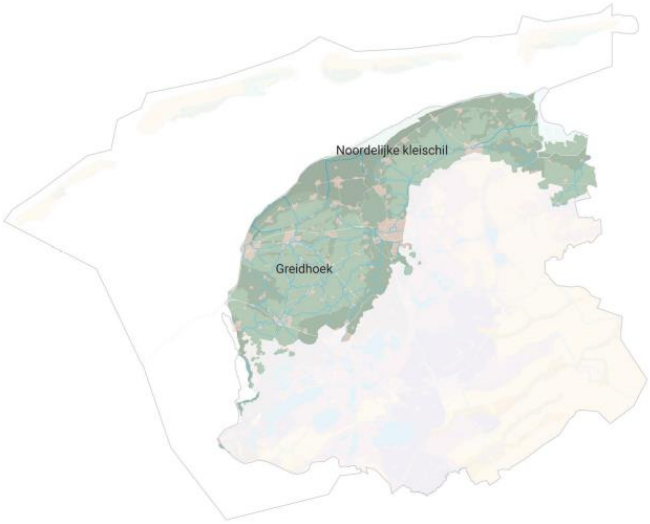


*Figuur 27: Zout grondwater stroomt Fryslân binnen*

In grote delen van het noordelijk zeekleigebied is het oppervlaktewater te zout voor bijvoorbeeld beregening. Om beregening van vollegronds tuinbouwgewassen en bloembollen mogelijk te maken is dan ook aanvoer van zoet oppervlaktewater nodig. Het zoete water om de sloten door te spoelen voert Wetterskip Fryslân aan vanuit de Friese boezem. Voor het grootste deel van het gebied wordt voor het doorspoelen gebruik gemaakt van dezelfde voorzieningen als voor water aan- en afvoer voor peilhandhaving nodig zijn. Het meeste water kan middels inlaten onder vrij verval worden ingelaten en wordt met de afvoergemalen weer uitgemalen. Alleen in de hoger gelegen zone langs de zeedijk zijn op een aantal plaatsen opvoergemalen geplaatst om het water naar deze hogere gebieden te pompen. Het is met het doorspoelen niet mogelijk om het zoutgehalte in elke sloot te beïnvloeden. Alleen in doorlopende hoofdwatergangen is voldoende stroming om het zout weg te spoelen. In alle andere watergangen is het zoutgehalte vaak te hoog om het water te gebruiken voor beregening. In een aantal akkerbouwgebieden zijn dan ook extra maatregelen getroffen om de doorspoeling te verbeteren. In deze gebieden wordt met behulp van extra gemalen, stuwen en inlaten het zoete water beter over het gebied verdeeld.

Eenzijdige bemesting (zonder organische stof) heeft in de afgelopen decennia in combinatie met intensieve grondbewerking geleid tot dusdanige verandering van de verhouding koolstof/stikstof (C/N quotiënt) dat vaker en over grotere oppervlakte “slemp” optreedt. Daarmee infiltreert minder zoet water in de grond, en door oppervlakkige afspoeling van kleideeltjes, nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen verslechterd de oppervlaktewaterkwaliteit. De achtergrondbelasting

van oppervlaktewateren met nutriënten vanuit de bodem is op kleibodems ook hoger, omdat deze bodems van nature rijk zijn aan nutriënten. In de Greidhoeke waren over aanzienlijke oppervlakten oude graslanden met dikke “cultuurdekken” aanwezig. Door uitvoering van ruilverkavelingswerken en intensivering van het grondgebruik zijn die dikke organische cultuurdekken geoxideerd en daarmee verdwenen.




*Figuur 28: kleigronden van Fryslân (Bron: Werkboek verkenning BOVI Wetterskip Fryslân, H+N+S Landschapsarchitecten, 2021)*

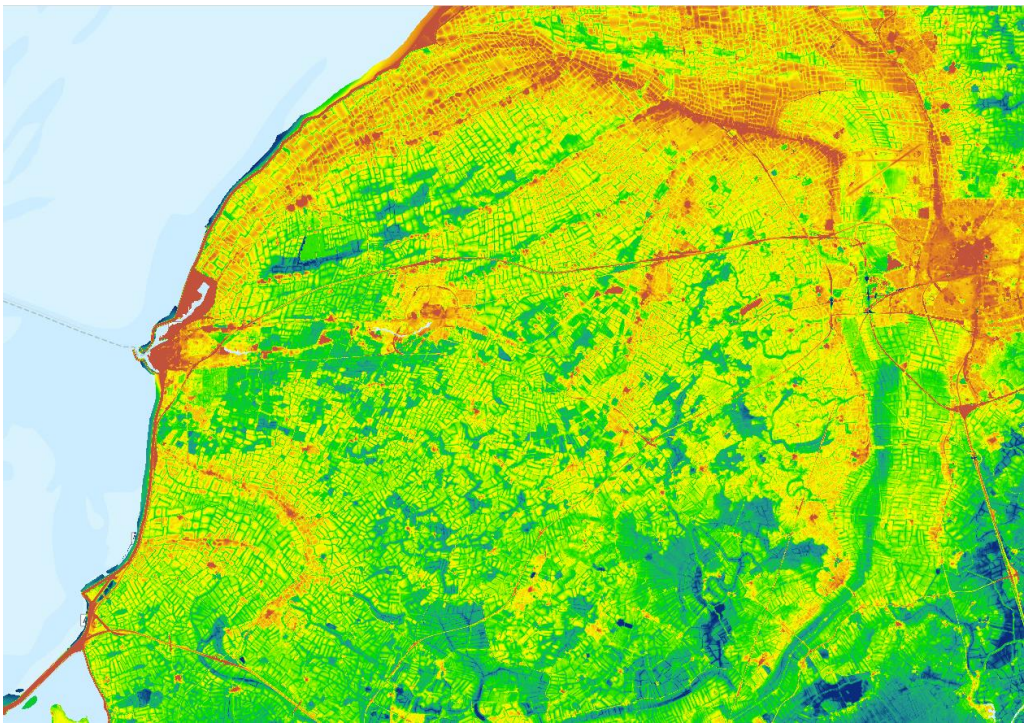
Het zeekleigebied van Fryslân kunnen we opdelen in de Noordelijke kleischil en de Greidhoeke in het westen (zie figuur 28).

### De Greidhoeke

De Greidhoeke ligt in de driehoek tussen Harlingen, Leeuwarden en Workum. Het gebied bestaat uit (zware) kleigronden. Het gebied watert grotendeels via de boezem af op de Waddenzee. Het noordelijk deel van de Greidhoeke ligt iets boven NAP (zie figuur 29), het zuidelijk deel net daaronder. In het zuidwesten ligt een aantal diepe droogmakerijen. Aan de westkant ligt tussen Harlingen en Stavoren een noord-zuid verlopende kwelderwal. Tussen Harlingen en Bolsward is de Marneslenk nog duidelijk herkenbaar in het landschap. Deze oude zeeslenk wordt begrensd door een duidelijk herkenbare kwelderwal. Doordat de Marneslenk veel langer onder invloed van de zee is geweest dan het omliggende gebied ligt het land in de Marneslenk nu relatief hoog. De bodem bestaat hier uit lichte en zware kalkhoudende zavelgronden. Deze gronden zijn voor een groot deel in gebruik voor akkerbouw. Dit gebied wordt ook wel de Lytse Bouhoeke genoemd.

Aan de oostkant van het gebied is de oude Middelzee nog goed herkenbaar. Het deel van de voormalige Middelzee bestaat uit zware kalkhoudende kleigronden, terwijl het “oude” land bestaat uit zware kalkarme kleigronden.

Het gebied wordt gekenmerkt door een groot aantal afwateringseenheden en peilgebieden (resp. ca. 200 en ca. 1700). Het boezemstelsel ligt als een fijn vertakt netwerk van vaarten door het gebied. De Greidhoeke bestaat vooral uit graslanden die in gebruik zijn bij de (melk)veehouderij. Een dijkzone (met dijk en buitendijkse gronden) deels langs IJsselmeer- en deels langs Waddenkust beschermt de Greidhoeke tegen overstroming.



*Figuur 29: Hoogtekaart van de Greidhoeke (blauw en groen is laag, geel en oranje is hoog)*

## De noordelijke kleischil

De Noordelijke kleischil is een gebied met een dik kleidek dat in een boog tussen Harlingen en het Lauwersmeer ligt. Het gebied wordt gekenmerkt door kwelderwallen, kweldervlakten, oude dichtgeslibde slenken en terpen achter de Waddendijk. Het gebied bestaat uit het 'oude' land, de gebieden Oostergo en Westergo en het 'nieuwe' land, de voormalige Middelzee. Het 'oude' land bestaat voor een groot deel uit lichte en zware kalkarme zavelgronden en kent een grote variatie in hoogteligging door de kwelderwallen en kweldervlakten. Het gebied van de voormalige Middelzee bestaat uit lichte en zware kalkrijke zavelgronden. Verder het binnenland in liggen de zwaardere kleigronden. Het gebied ligt grotendeels op en boven NAP, waarbij de voormalige Middelzee gemiddeld iets hoger ligt dan het 'oude' land. De hoogteverschillen in de voormalige Middelzee zijn over het algemeen ook iets kleiner.

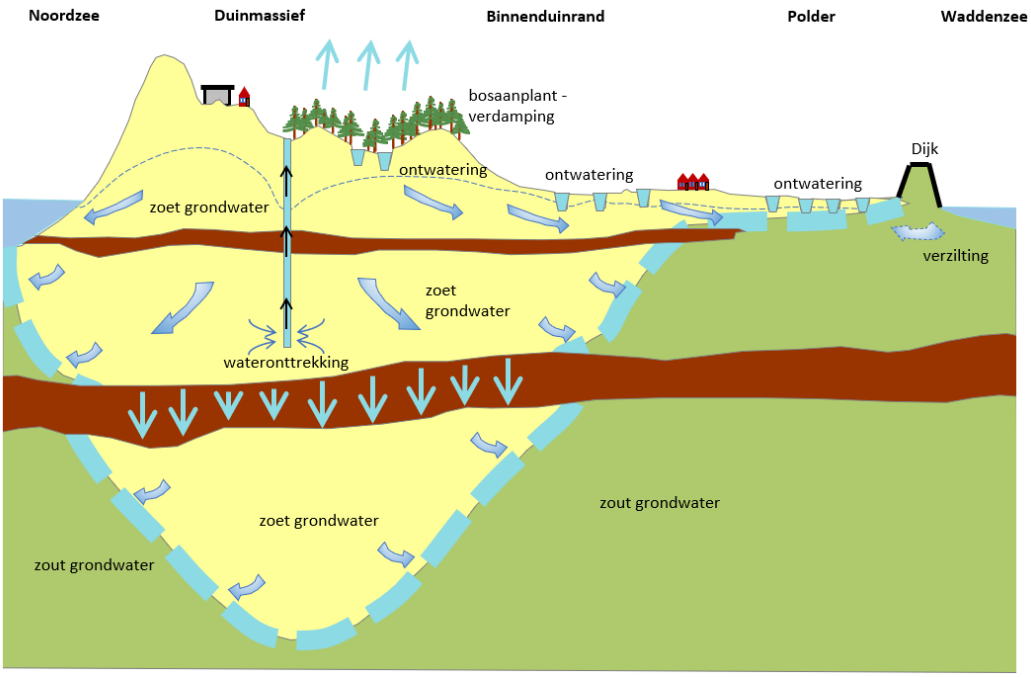
Het gebied wordt gekenmerkt door grote afwateringsgebieden met grote peilvakken, waardoor dit gebied veel minder versnipperd is dan de Greidhoeke. Drie afwateringsgebieden, de zogenaamde afgekoppelde gebieden, wateren via een gemalen rechtstreeks af op de Waddenzee. Deze gebieden zijn voor de wateraanvoer in de zomer wel afhankelijk van het boezemstelsel en het IJsselmeer. De rest van de noordelijke kleischil watert middels gemalen af op de boezem. Door de grote afwateringsgebieden zijn relatief weinig boezemkanalen in het gebied aanwezig. Veel historische boezemvaarten maken nu onderdeel uit van de poldersystemen.

Door de vruchtbare zavel- en lichte kleigronden, is de noordelijke kleischil een belangrijk gebied voor de Friese landbouw. Het landgebruik in de noordelijke schil van het kleigebied is vooral akkerbouw en vollegrondstuinbouw. In het algemeen zijn de drooglegginge in het zeekleigebied relatief groot. De noordelijke kleischil wordt beschermd door een dijkzone (dijk, kwelders) langs de Waddenzee.

Langs een groot gedeelte van de kleischil is een primaire kering aanwezig. Naast de waterkerende functie, vormt de dijk ook een belangrijk leefgebied voor allerlei soorten. Voor sommige soorten is de dijk zelfs heel specifiek leefgebied. De dijk is dus belangrijk voor de Friese biodiversiteit.

## 2.5 Friese Waddeneilanden

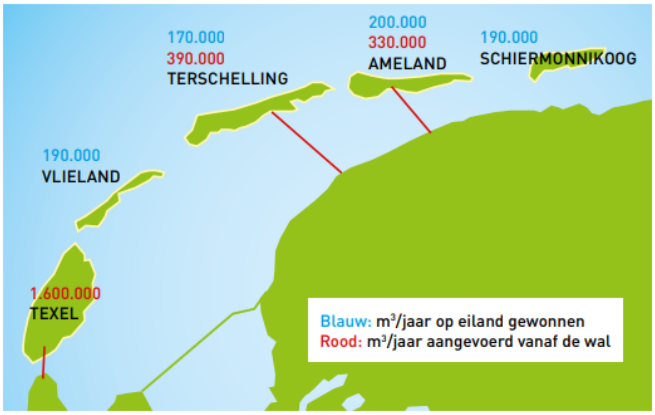
De Friese Waddeneilanden Schiermonnikoog, Ameland en Terschelling kenmerken zich met de opbouw van strand en duin aan de Noordzeezijde. De duinen gaan via de zogeheten binnenduinrand over in het poldergebied. Aan de Waddenzeezijde worden de polders beschermd door Waddendijk. Vlieland bestaat vrijwel alleen uit strand en duinen. Aan de zuidkant van de eilanden liggen op diverse plekken nog kwelders. Bij hoogwater staan deze kwelders onder water. De duinen, strand en zandplaten bestaan uit kalkrijke zandgronden, de binnenduinrand uit humusrijke zandgronden en de polders uit zandige en kleiige gronden, die door de zee zijn afgezet. De vier Waddeneilanden zijn erg belangrijk voor de natuur. Van het totale landoppervlak heeft 80% een natuurbestemming. In totaal gaat het om 18.000 hectare natuur, Waddenzee en Noordzee niet meegerekend. Verder zijn de Waddeneilanden van grote betekenis voor recreatie en toerisme. Jaarlijks bezoeken ruim 1,5 miljoen toeristen de Waddeneilanden. De neerslag die op zandgronden van de duinen valt trekt de grond in (infiltratie). Hierdoor wordt het grondwater onder de duinen aangevuld met zoet water. Het zoete grondwater drukt het zoute grondwater weg naar de diepte, waardoor er onder de eilanden een zoetwaterbel is ontstaan (zie figuur 30). Door de aanwezigheid van dit zoete grondwater is er op de Waddeneilanden drinkwater beschikbaar en landbouw mogelijk. Dit grondwater is ook van belang voor de natuur. Op diverse plekken op de Waddeneilanden komen duinvalleien voor met een grondwaterafhankelijke vegetatie. Ook langs de binnenduinrand komen op sommige plekken grondwaterafhankelijke vegetaties voor. De Waddeneilanden worden beschermd tegen de zee door de duinwaterkering langs de Noordzee en de Waddendijk langs de Waddenzee.




*Figuur 30: Schematische doorsnede Waddeneiland*

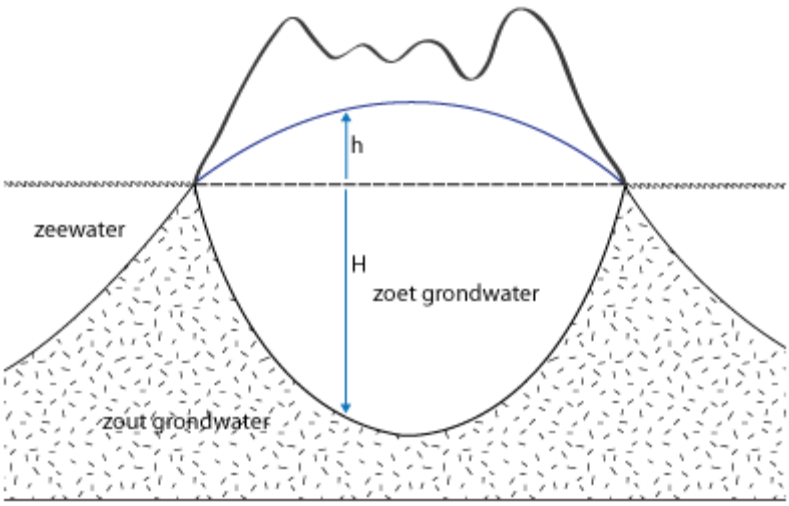
De wateraanvoer op de eilanden bestaat alleen uit het regenwater. Het water in de poldersloten is deels hemelwater, deels kwelwater vanuit de duinen en deels zout kwelwater. Kenmerkend voor de eilanden is de trage afvoer uit de duinen, die belangrijk is voor de agrarische functie van de polder. Door de trage afvoer van water uit de duinen is er een groot deel van de zomer zoet water beschikbaar voor peilhandhaving en veedrenking. Beschikbaarheid van dit zoete water is geen garantie. Gedurende droge jaren kan deze aanvoer volledig wegvallen. Dit is per eiland verschillend.

Ook op de eilanden is in de loop van de vorige eeuw een openbare drinkwatervoorziening tot stand gebracht. Op zich wonen er niet zo veel mensen op de eilanden, maar er komen wel veel toeristen. De drinkwatervraag kent hierdoor in het toeristisch hoogseizoen een veel grotere piekfactor dan op het vasteland. Soms is de vraag naar drinkwater in de zomer op de eilanden drie keer zo hoog dan in de winter, terwijl dat op het vasteland 1,5 keer zo hoog is. Het drinkwater wordt gewonnen uit de zoetwaterbel onder de duinen. Omdat in vergelijking met het vasteland het zoute grondwater nog dichterbij is, is verzilting van het drinkwater op de eilanden een reëel risico. Terschelling en Ameland krijgen via de wadleiding ook drinkwater vanaf het vaste land (zie figuur 31).




*Figuur 31: Drinkwater op de Waddeneilanden (Bron: Sander Peters, H2O, nr. 11 2013)*

Het watersysteem op de eilanden is, net als op het vaste land, in de loop der tijd veranderd door menselijk ingrijpen. De drinkwaterwinningen in de duinen hebben invloed op de zoetwaterbel onder de eilanden. Daarnaast is in de duinen ontwatering aangelegd om de natte duinvalleien geschikt te maken voor landbouw. Tegenwoordig is de ontwatering van de duinvalleien vooral nodig voor infrastructuur en recreatie. Hierdoor is de grondwaterstand in de duinen verlaagd. Dit heeft ook een negatieve invloed op de dikte van de zoetwaterbel. Door het dichtheidsverschil tussen zoet en zout water drijft de zoetwaterbel op het zoute water. De dikte van de zoetwaterbel wordt bepaald door de opbolling van de grondwaterstand boven het zeeniveau (h). Op de Waddeneilanden is de verhouding H/h (zie figuur 32) ongeveer een factor 15 tot 25. Dit betekent dat bij een opbolling van 1 m een zoetwaterbel van 15 tot 25 m voorkomt.




*Figuur 32: Schematische doorsnede van een zoetwaterbel (Bron: www.grondwaterformules.nl)*

De dikte van de zoetwaterbel op de eilanden verschilt per eiland. De zoetwaterbel op Schiermonnikoog is 90 m dik, op Ameland 50-60 m, op Terschelling 50-100 m en op Vlieland 45 m (Bakker, 1981).

De binnenduinrand is van nature erg nat, omdat hier de grondwaterstand bijna tot aan maaiveld komt. Tegenwoordig wordt de binnenduinrand sterk ontwaterd om het gebied geschikt te maken voor (vakantie)woningen en recreatie. Dit zorgt voor een grondwaterstandsverlaging en een afname van de grondwaterinvloed aan maaiveld. Het grondwater wordt door de ontwatering versneld afgevoerd naar de polder. Door de relatief lage peilen in de polder kan zout grondwater richting het oppervlaktewater stromen, waardoor verzilting van de sloten optreedt.

De polders op de eilanden kunnen onder vrij verval afstromen naar de Waddenzee. Alleen op Terschelling zijn gemalen aanwezig om in natte perioden met hoge zeewaterstanden het water uit de polder af te voeren naar zee. In de onderstaande tabel zijn de verschillen tussen de polders per Waddeneiland weergegeven.

| | Bijzonderheden |
|---|---|
| Vlieland | Inpoldering voor landbouwdoeleinden nooit gelukt, is nu natuurgebied met peilvakken (Kroonspolders) |
| Terschelling | Vrijafstromende polder met bemalen voor natte perioden met hoge zeewaterstanden, relatief lage peilen ten opzichte van zeeniveau |
| Ameland | Vrij afstromende polder met relatief hoge peilen ten opzichte van zeeniveau |
| Schiermonnikoog | Vrij afstromende polder met relatief hoge peilen ten opzichte van zeeniveau |

# 3. Impact autonome ontwikkeling en klimaatverandering

## 3.1. Autonome ontwikkelingen

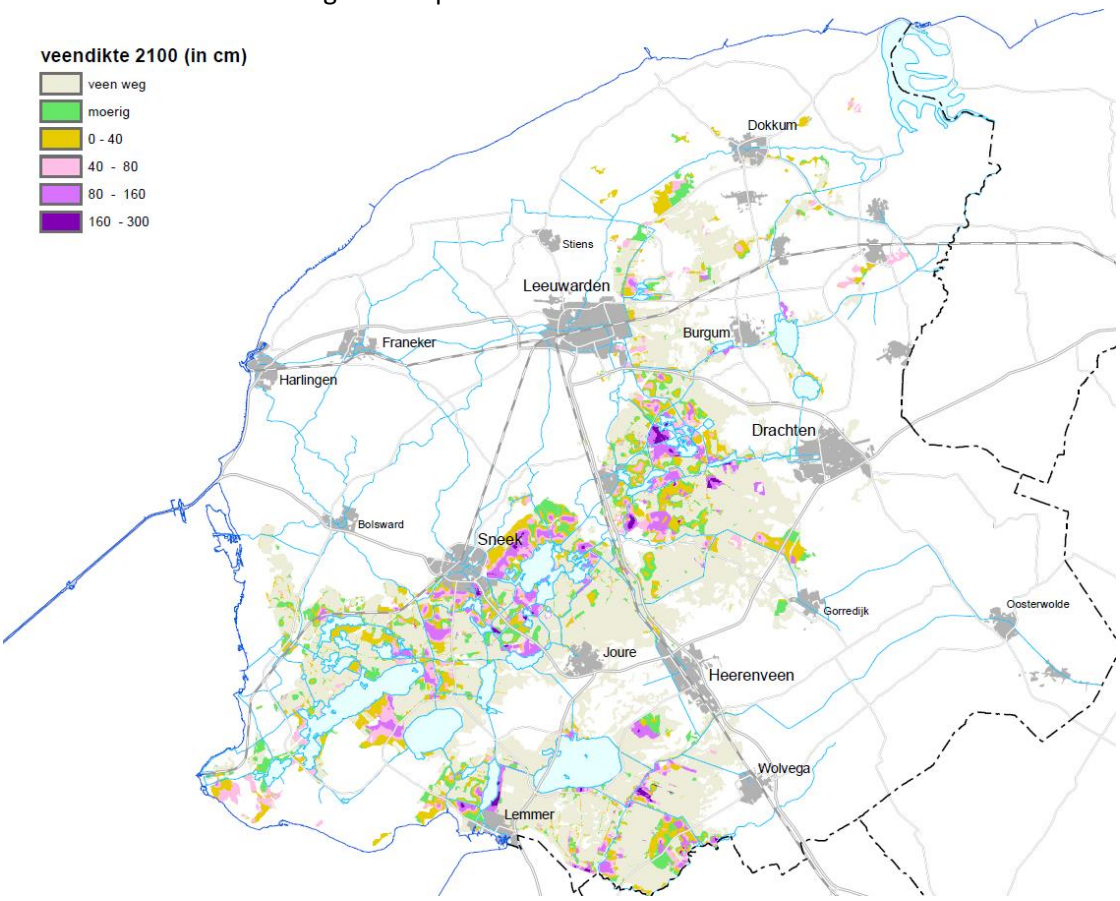
Onder de autonome ontwikkeling worden alle verwachte ontwikkelingen bij uitvoeren of voortzetten van het huidig beleid beschreven. Als een besluit formeel bestuurlijk is genomen, wordt aangenomen dat het ook daadwerkelijk gaat gebeuren. Dit geldt onder meer voor het peilbeleid volgens het Veenweideprogramma en de reductie van de drinkwaterwinning Terwisscha. Een aantal van deze besluiten moet echter nog wel worden uitgevoerd. Klimaatverandering is ook een autonome ontwikkeling, maar wordt in de volgende paragraaf beschreven.

### Bodemdaling

Als gevolg van delfstoffenwinning (aardgas en zout) treedt er bodemdaling op in verschillende deelgebieden van Fryslân. De nog te verwachte bodemdaling in de bestaande winningen en reeds vergunde winningen is over het algemeen beperkt tot maximaal 10 cm. In de grote gasvelden en bij de zoutwinning is de totale bodemdaling door de winning wel veel groter, maar deze daling is grotendeels al opgetreden.

### Veenoxidatie en maaivelddaling

Door het huidige peilbeheer, ontwatering en kerende grondbewerking treedt oxidatie van veengronden op. Door de veenoxidatie daalt het maaiveld. Als het huidige peilbeheer, ontwatering en gebruik van de veengronden wordt voortgezet is in 2100 nauwelijks nog veengrond over (zie figuur 33). Als de veenbodem is verdwenen blijft de onderliggende zandgrond over. Net als op de hoge zandgronden is hier ondiep vaak keileem aanwezig. De diepe ligging en de kweldruk zullen structureel natte omstandigheden opleveren.



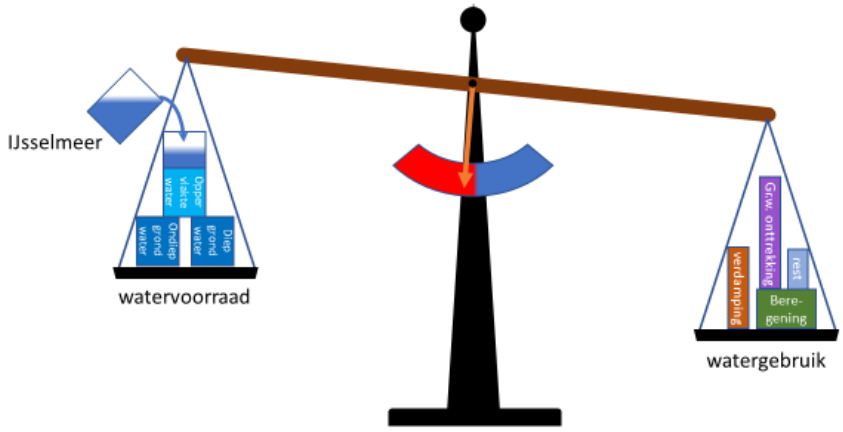

*Figuur 33: Veendikte in 2100 bij ongewijzigd beleid (peil volgt maaivelddaling) (Bron: Veenweideprogramma 2021-2030, Achtergronddocument)*

Om de veenoxidatie en de $CO_2$-uitstoot te beperken zijn in het Veenweideprogramma ’21-’30 maatregelen opgenomen om de oxidatie van veen te beperken. De belangrijkste maatregel is het verhogen van de grondwaterstand tot 40 cm onder maaiveld. Met het verhogen van de grondwaterstand wordt de veenoxidatie vertraagd en de $CO_2$-uitstoot beperkt. De veenoxidatie wordt niet gestopt waardoor telkens nieuwe peilverlagingen nodig zijn om het huidige grondgebruik in stand te houden. Hierdoor verdwijnt het veen op lange termijn toch. Het proces wordt wel vertraagd door de hogere peilen.

### Zoetwaterbalans

Door het huidige beheer van het grond- en oppervlaktewatersysteem en het gebruik van water is de waterbalans voor Fryslân niet in evenwicht. De totale vraag naar zoet water is groter dan de beschikbare hoeveelheid grond- en oppervlaktewater binnen Fryslân. Het tekort wordt aangevuld met water uit het IJsselmeer (zie figuur34). Door klimaatverandering neemt de temperatuur en de verdamping toe, waardoor de watervraag in de zomer toeneemt. Het gaat hierbij niet alleen om watervraag door landbouwgewassen, maar ook de drinkwatervraag neemt toe. Dit betekent dat de balans steeds schever wordt. Om dit op te lossen is steeds meer IJsselmeerwater nodig. Door de klimaatverandering en de afname van de rivierafvoeren neemt de kans op watertekort in het IJsselmeer toe. Dit betekent dat het IJsselmeer niet altijd voldoende water kan leveren, waardoor schade aan landbouwgewassen en natuur ontstaat.

Er is geen balans in het huidige systeem en die balans wordt door klimaatverandering steeds schever, waardoor de roofbouw op het grondwatersysteem toeneemt.




*Figuur 34: Zoetwaterbalans*

### Ruimtelijke ontwikkelingen in de pijplijn

De mens zal de komende 50 tot 100 jaar verder zijn stempel op het beheersgebied van Wetterskip Fryslân drukken. Er zullen vanuit de Nationale Omgevingsvisie (Extra) meer woningen gebouwd worden en er wordt nagedacht over de aanleg van de Lelylijn (treinverbinding tussen Lelystad en Groningen via Drachten). Ook de energietransitie en het nastreven van meer biodiversiteit zullen hun invloed hebben op de ruimtelijke inrichting van Fryslân. Al deze ontwikkelingen hebben ook invloed op het watersysteem van Fryslân.

### Assets van Wetterskip Fryslân

Ook de inrichting van het watersysteem met gemalen, kaden en watergangen vraagt om een continue zorg. Fryslân heeft veel gemalen, stuwen, peilgebieden en waterkeringen. Dit maakt dat de

onderhouds- en vervangingsopgave ook fors is. De komende jaren moeten veel gemalen en stuwen worden vervangen. Veel van de huidige gemalen zijn om niet verkregen in de ruilverkaveling. Dit betekent dat pas vanaf het moment van vervangen de afschrijving of vervangingskosten voor rekening van het waterschap komen. Dit betekent dat jaarlijks de kosten voor de vervanging van de huidige assets fors toenemen. De kosten voor de vervanging van de assets ligt in het jaar 2050 rond de 43 miljoen per jaar (nu 17,7 miljoen per jaar) (DB-presentatie 5 oktober 2021). Verder is het nodig om bij de vervanging van de huidige assets rekening te houden met de (toekomstige) klimaatverandering. De mate waarin rekening gehouden moet worden met klimaatverandering bij vervanging is afhankelijk van de welke extreme weersituaties het waterschap wil kunnen beheersen. Hierover moeten nog keuzes gemaakt worden.

## 3.2. Klimaatverandering

Voor de beschrijving van de effecten van klimaatverandering op het water- en bodemsysteem van Fryslân wordt gebruik gemaakt van het KNMI Klimaatsignaal'21 en de KNMI klimaatscenario's 2014 ($W_L$ en $W_H$) (zie bijlage 2).

De belangrijkste klimaatontwikkelingen die invloed hebben op het watersysteem zijn:

- Zeespiegelstijging (45-80 cm in 2085 (KNMI, 2014) en 1,2 m in 2100 (KNMI klimaatsignaal'21));
- Meer neerslag in de winter;
- Meer extreme buien in de zomer;
- Vaker langdurige droogte in voorjaar en zomer;
- Afnemende rijnafvoer en daardoor tekorten op het IJsselmeer.

## 3.3. Fryslân

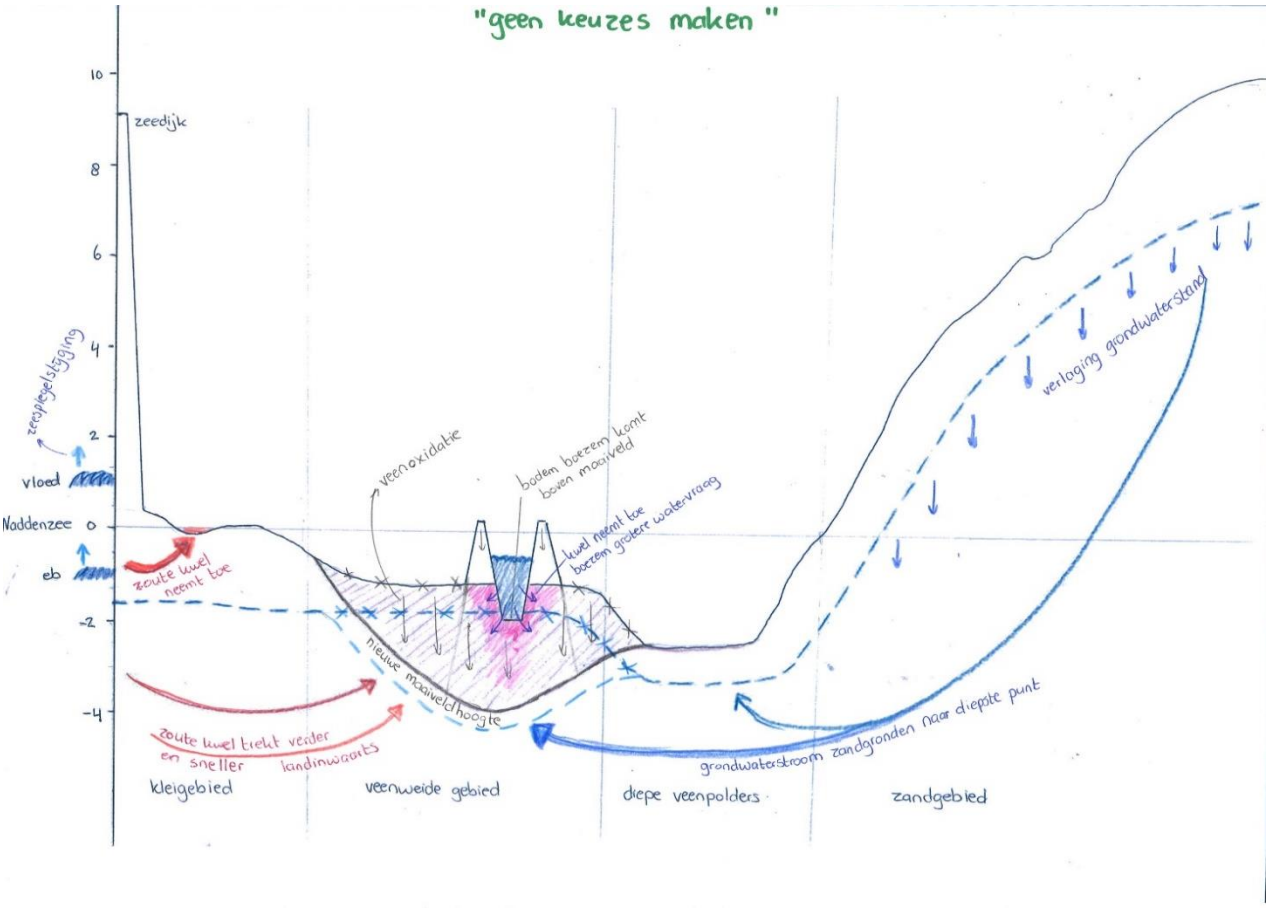
De autonome ontwikkelingen en klimaatverandering hebben invloed op het beheergebied van Wetterskip Fryslân. In deze paragraaf worden de effecten hiervan op Fryslân beschreven.

### Toekomstige veranderingen van het grondwatersysteem

De klimaatverandering en andere autonome ontwikkelingen hebben ook invloed op het grondwater. In hoofdstuk 2.1 is een beschrijving gegeven van het huidige grondwatersysteem. Hieruit blijkt dat het lage midden van Fryslân grote invloed heeft op het grondwatersysteem.

Vooral het verdwijnen van het veen heeft grote effecten op het functioneren van het grondwatersysteem. Om de te laten zien hoe belangrijk het veengebied is in het functioneren van het watersysteem is een doorsnede gemaakt (figuur 35) van het grondwatersysteem op lange termijn (2150-2200). Deze doorsnede is "geen keuzes maken" genoemd, omdat dit de lange termijngevolgen zijn van het voortzetten van het huidige beleid en de uitvoering van het huidige veenweideprogramma.

Ook in deze doorsnede is de hoogte op schaal en de lengte schaal in elkaar gedrukt. Door de uitvoering van het Friese veenweideprogramma wordt de oxidatie van veen in de 'kansrijke' gebieden (met een dik veenpakket) vertraagd door peilverhoging, terwijl in de andere delen de maaivelddaling ongeremd doorgaat. Doordat er slechts sprake is van het vertragen van de veenoxidatie is op lange termijn (ca. 2200) in Fryslân vrijwel al het veen verdwenen.




*Figuur 35: Effecten op het grondwatersysteem bij voortzetten huidige beleid (ca. 2200)*

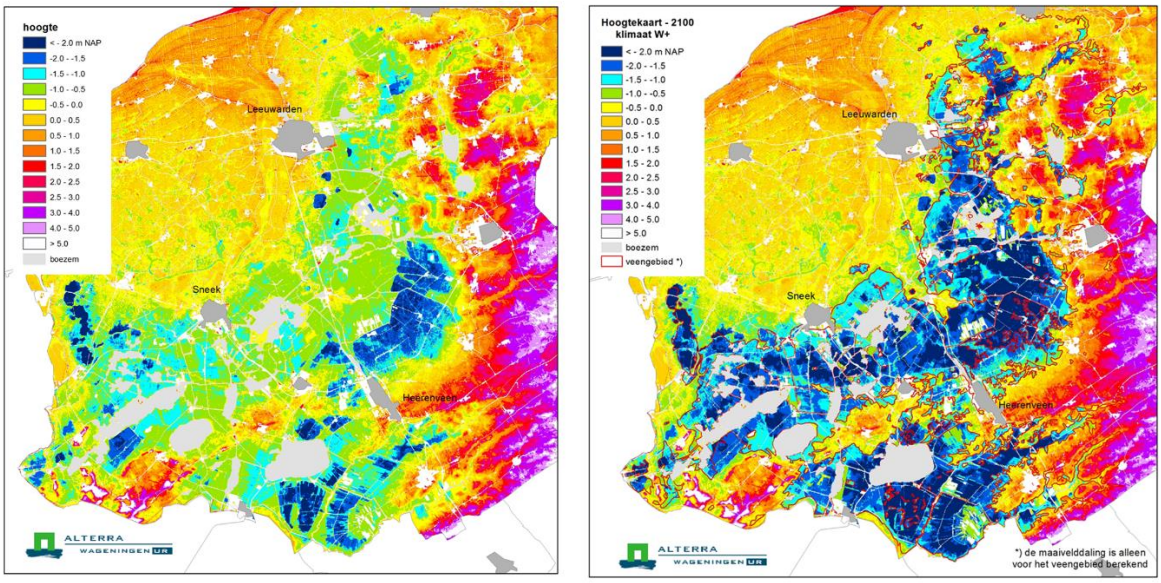
Door het verdwijnen van het veen daalt het maaiveld in het huidige veengebied naar een nieuwe maaiveldhoogte die varieert van -1 tot -3,5 meter NAP (zie figuur 35). Door het diepe gedeelte dat in het veenweidegebied ontstaat, wordt de grondwaterstroom vanuit de zandgronden (blauwe pijlen) nog harder aangetrokken door het lage midden van Fryslân. Op de zandgronden daalt daardoor de grondwaterstand. Dit effect wordt nog versterkt door de steeds drogere zomers en de toenemende watervraag.

Vanuit het westen neemt de zoute grondwaterstroom ook toe door het ontstane lage deel. Dit effect wordt versterkt door de zeespiegelstijging.

Het huidige veenweidegebied verandert op lange termijn in een ‘golvend’ zandlandschap met veel kwel vanuit de ondergrond. De afdekkende veenlaag, die kwel tegenhield, is door veenoxidatie verdwenen. Een deel van deze kwel  is afkomstig van de hoge zandgronden en is zoet en een deel van deze kwel is zout grondwater dat door de druk van het zeewater richting het lage gebied kan stromen.

Als het peil van de Friese boezem niet wordt aangepast aan het dalende maaiveld betekent dit dat de Friese boezem steeds verder boven het maaiveld komt te liggen. Als al het veen verdwenen is komt het boezempeil op veel plaatsen meer dan 2 m hoger dan het omliggende maaiveld te liggen. Door de hoge ligging van de boezem ten opzichte van het maaiveld zijn steeds bredere en sterkere waterkeringen nodig. Dit geldt niet alleen voor de kanalen, maar ook voor de Friese meren. Een andere effect van het hoge boezempeil ten opzichte van het omliggende gebied is de toenemende wegzijging uit de boezem naar de omliggende polders. Deze stroming van de boezem naar de polders heeft negatieve effecten op de stabiliteit van de keringen. Verder moet er steeds meer water vanuit

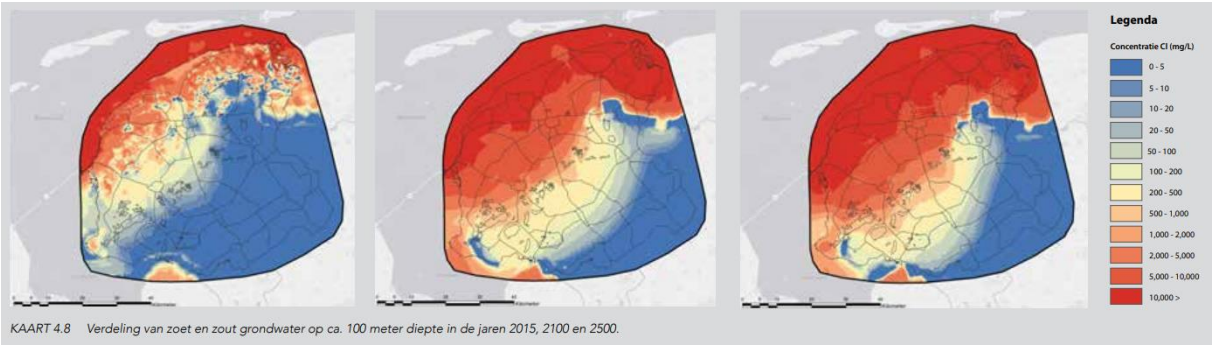
de polders naar de boezem gepompt worden. Hiervoor zijn grotere gemalen met een grotere opvoerhoogte nodig.




*Figuur 36: Maaiveldhoogte in Fryslân 20?? En 2100 (Bron: Alterra)*

Niet alleen het veen in het veenweidegebied verdwijnt op lange termijn, maar ook het veen in de beekdalen. Dit is ook goed te zien in figuur 36. Door het verdwijnen van het veen in de beekdalen gaan de beken dieper gaan insnijden, met name de Tsjonger. Dit zorgt voor fors lagere beekwaterstanden, waardoor het gehele systeem dieper ontwatert wordt. Ook dit draagt bij aan de verlaging van de grondwaterstand op de hogere zandgronden en de flanken van de beekdalen.

Door de toename van de kwelstroom richting het lage midden en de zeespiegelstijging neemt de verzilting in Fryslân toe (zie figuur 37). In de grondwaterstudie is de toename van de verzilting berekend. De herberekeningen (RHDHV, 2022) naar aanleiding van de peer review van de grondwaterstudie (Deltares, 2022) hebben dit beeld bevestigd (zie bijlage 3).

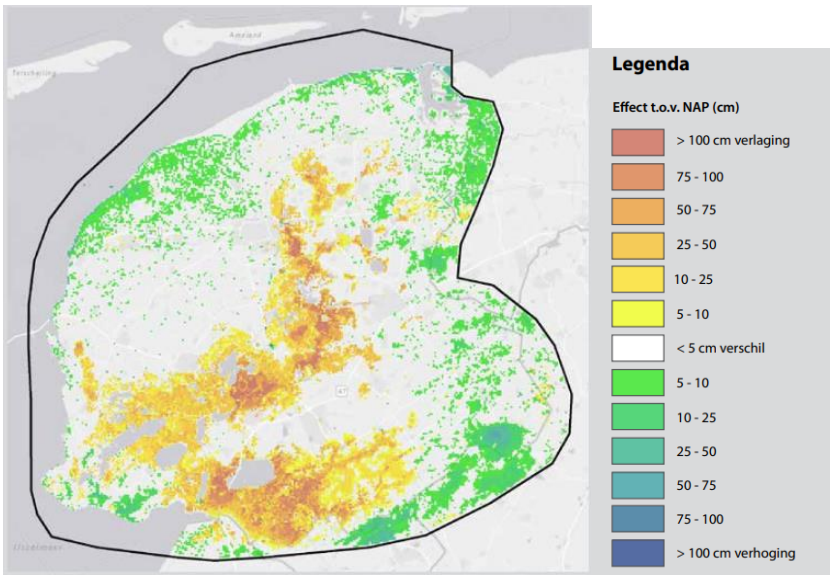



*Figuur 37: Verdeling van zoet en zout grondwater op ca. 100 meter diepte in de jaren 2015, 2100 en 2500 (Bron: Grondwateratlas Fryslân)*

Voor het noordelijk kleigebied, waar veel akkerbouw voorkomt betekent dit dat steeds meer water nodig is voor de doorspoeling van de watergangen. Verder neemt de zoetwaterlens in de percelen af, waardoor het risico op zoutschade flink toeneemt. Door de steeds grotere zoetwatervraag door de toenemende droogte en de toenemende kans op watertekorten in het IJsselmeer nemen de mogelijkheden om de watergangen door te spoelen af, zeker in droge zomers. De verzilting in de percelen kan alleen worden beperkt door het goed beheren van de percelen door bijvoorbeeld

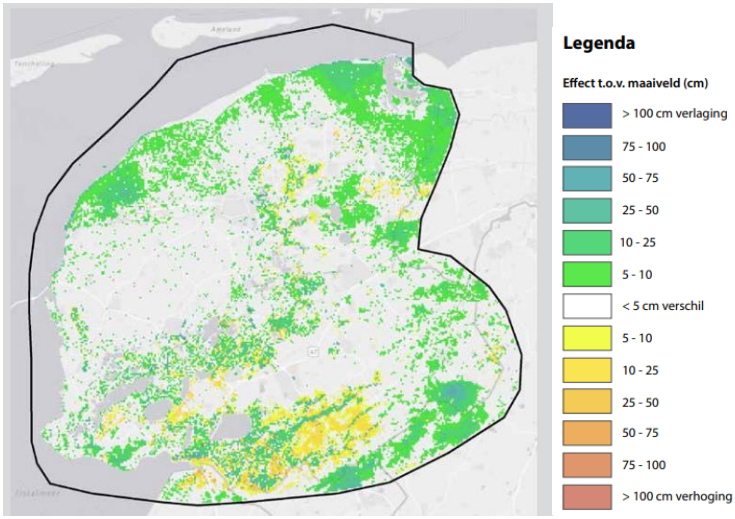
aangepaste drainage of zoetwateropslag. De laagste delen in het kleigebied worden door de toenemende verzilting ongeschikt voor de huidige akkerbouwgewassen.

In de grondwaterstudie Fryslân is berekend wat de grondwaterstanden zijn in 2085, waarbij alle autonome ontwikkelingen zijn meegenomen. Er is uitgegaan van een gematigd klimaatscenario ($G_H$), gemiddelde zeespiegelstijging, drogere zomers, nattere winters, zie bijlage 2). In figuur 38 is te zien dat de wintergrondwaterstanden (GHG) in 2085 in sommige delen van het veengebied met meer dan een meter dalen ten opzichte van NAP, ondanks de hogere neerslag. Deze daling van het grondwater wordt vooral veroorzaakt door de maaivelddaling als gevolg van veenafbraak. In het noorden (kleigebied) en het zuidoosten (zandgebied) van Fryslân wordt een lichte stijging van de grondwaterstand berekend. Dit komt door de toename van neerslag in de herfst/winter. Verder is in het uiterste zuidoosten op de kaart een groene vlek te zien. Dit is de grondwaterstijging die het gevolg is van het reduceren van de drinkwaterwinning Terwisscha. In de rest van Fryslân verandert de GHG amper of stijgt licht.



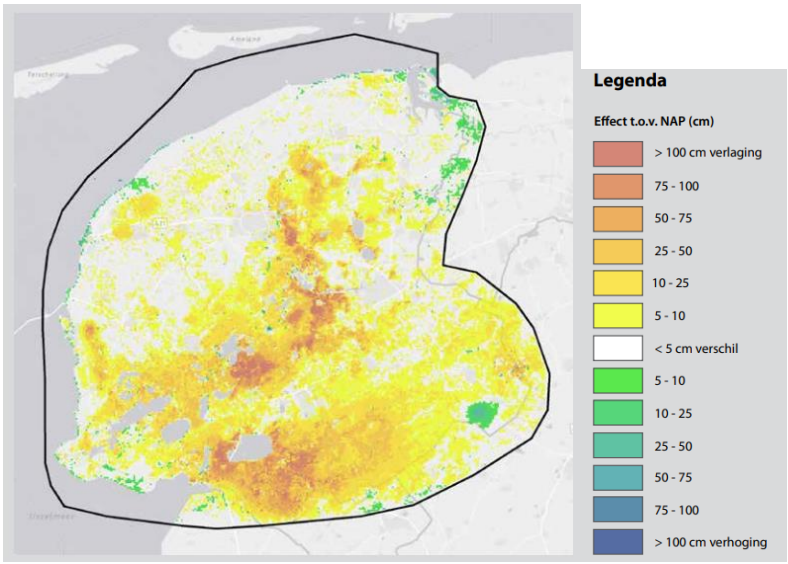

*Figuur 38: De verandering van de wintergrondwaterstand (GHG) in 2085 bij het huidige beleid (en autonome ontwikkelingen) en het $G_H$ klimaatscenario (Bron: Grondwateratlas Fryslân)*

De grondwaterstanden kunnen ten opzichte van NAP dus behoorlijk dalen, maar als de toekomstige grondwaterstand wordt vergelijken met de toekomstige (gedaalde) bodemhoogte in 2085 is het beeld anders (zie figuur 39). In het veenweidegebied wordt het zelfs natter dan in de huidige situatie. Wat opvalt is dat ook de beekdalen, vooral De Tsjonger, natter worden. Dit komt doordat het veen in deze gebieden in de toekomst door de afbraak van veen gaat verdwijnen. Hierdoor stroomt er vanuit de omliggende hogere zandgronden meer grondwater naar de beekdalen. De zandgebieden worden daardoor juist droger, ondanks de grotere neerslag die in de herfst/winter valt.




*Figuur 39: De verandering van de wintergrondwaterstand (GHG) in 2085 bij het huidige beleid en autonome ontwikkelingen en het $G_H$ klimaatscenario ten opzichte van maaiveld (blauw en groen = natter en geel = droger)(Bron: Grondwateratlas Fryslân)*

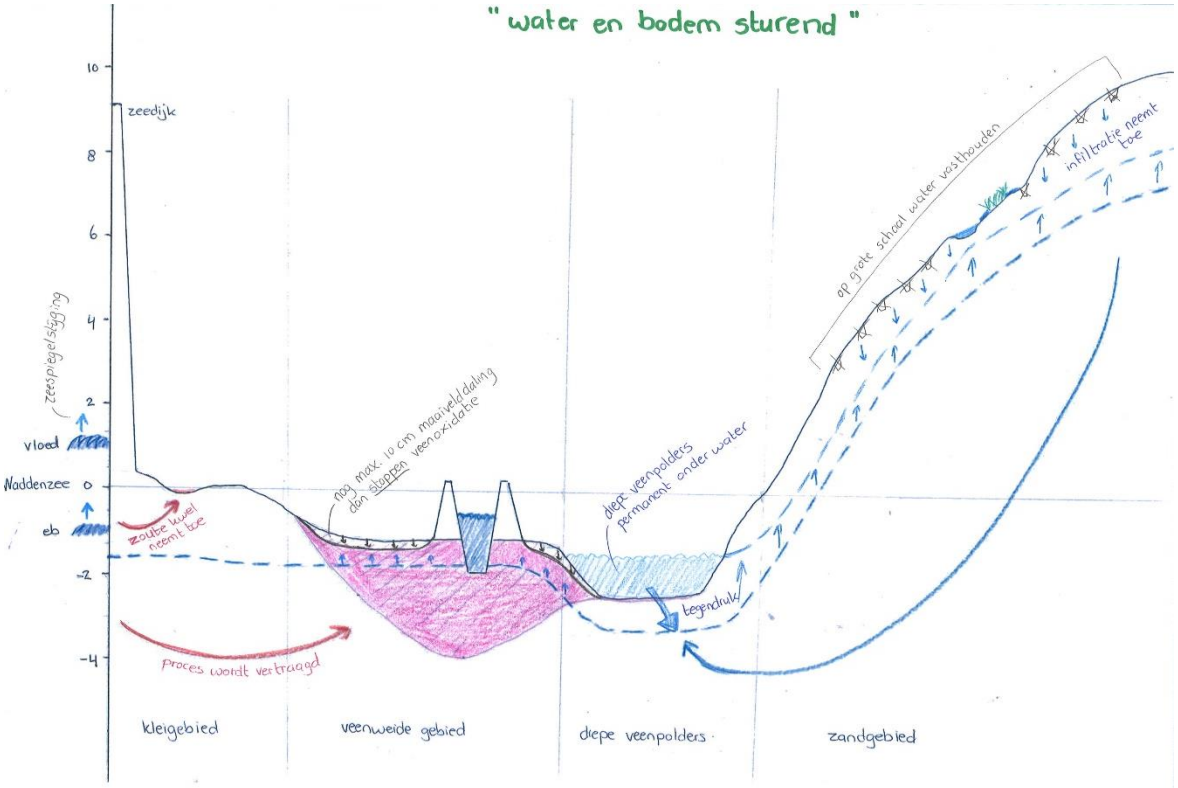
Uit dezelfde berekeningen blijkt dat voor grondwaterstanden in de zomer (GLG) in 2085, met als kader het klimaatscenario $G_H$, in bijna heel Fryslân sprake is van een daling van de grondwaterstand (zie figuur 40). In veel gevallen gaat het om een daling van 5 tot 25 cm. De grotere dalingen (van 50 cm tot ruim 100 cm) zijn het gevolg van de maaivelddaling in het Friese veenweidegebied. De groene rand (stijging GLG) langs de Waddenzee wordt veroorzaakt door de zeespiegelstijging. In Gaasterland ligt eveneens een smalle groene strook als gevolg van de verhoging van het IJsselmeer-zomerpeil. Verder is er alleen nog een stijging van de grondwaterstand rond Terwisscha als gevolg van de beperking van de drinkwateronttrekking. De grondwaterstanden in de zomer gaan dus in bijna heel Fryslân flink lager worden.




*Figuur 40: Verandering van de GLG (einde zomer) ten opzichte van NAP als gevolg van de autonome ontwikkeling bij het $G_H$-scenario in 2085 (Bron: Grondwateratlas Fryslân)*

Omdat het verdwijnen van het veen grote invloed heeft op het grondwatersysteem is ook een denklijn ontwikkeld waarin de uitgangspunten van water en bodem sturend maximaal zijn toegepast.

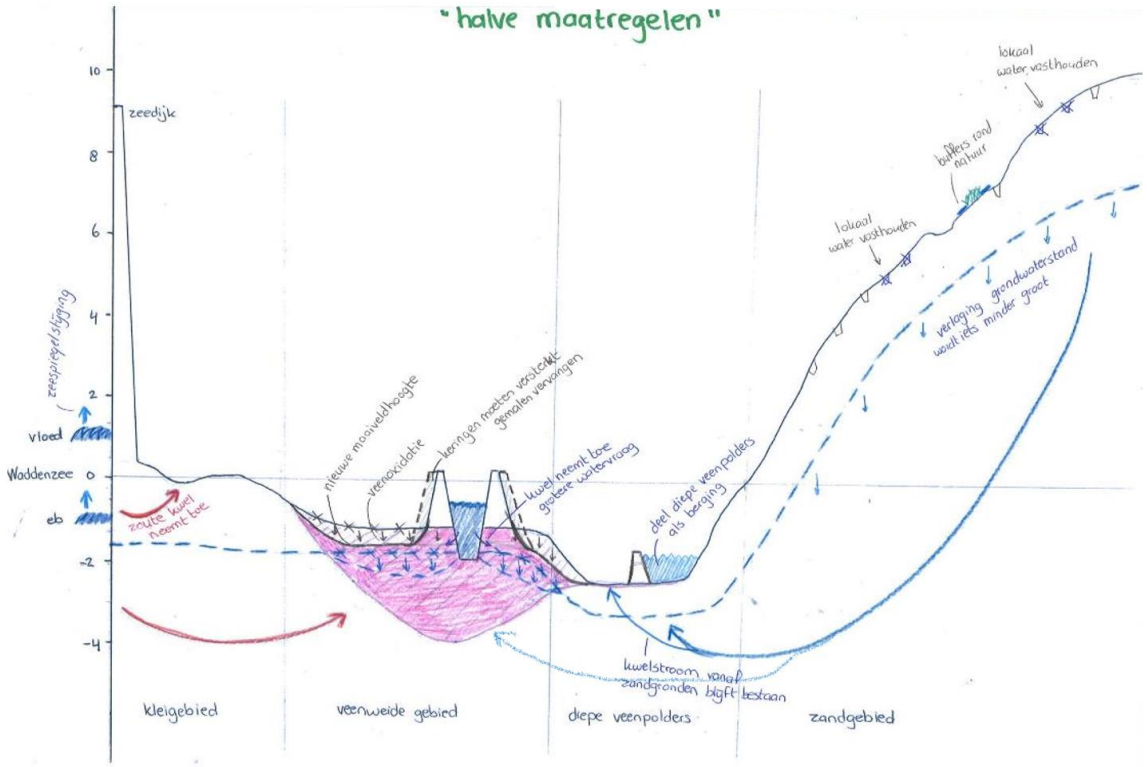
In figuur 41 staat weer dezelfde dwarsdoorsnede van Fryslân. In deze doorsnee zijn de effecten weergegeven als maatregelen genomen worden waarbij water en bodem volledig sturend zijn. De veenoxidatie is als gevolg van vernatting door peilverhoging tot aan maaiveld zo rond 2035 helemaal gestopt, zodat veen behouden blijft en het maaiveld niet verder daalt. De diepe zoute grondwaterstroom vanaf de kust wordt daardoor niet versterkt. Ook de grondwaterstroom vanaf de hoge zandgronden neemt niet toe. Doordat de diepe veenpolders permanent onder water zijn gezet wordt tegendruk geleverd. Hier neemt de kwel naar het lage midden af en wordt er minder "getrokken" aan de grondwaterstroom vanaf de zandgronden. In combinatie met waterconservering op de zandgronden op grote schaal, stijgt de grondwaterstand op de zandgrond weer, waardoor de droogteschade voor landbouw en de verdroging van natuur afneemt en de voorraad zoet grondwater toeneemt.




*Figuur 41: Effecten op het grondwatersysteem bij water en bodem sturend*

In het noordelijk kleigebied neemt de verzilting nog steeds toe door de zeespiegelstijging. Door het permanent onder water zetten van de diepe veenpolders ontstaat een eigen zoetwatervoorraad, die kan worden gebruikt voor het doorspoelen van de watergangen. De verzilting in de percelen kan worden beperkt door het goed beheren van de percelen door bijvoorbeeld aangepast drainage of zoetwateropslag.

De denklijn "water en bodem sturend" heeft grote impact op de inrichting van Fryslân en vraagt veel ruimte en aanpassing van de huidige functies. Vanwege deze grote impact is de kans groot dat er wordt gekozen voor minder vergaande maatregelen, ofwel "halve maatregelen".




*Figuur 42: Effecten grondwatersysteem als "halve maatregelen" worden genomen*

In figuur 42 staat een doorsnee waarin "halve" maatregelen zijn genomen. Slechts een deel van de diepe veenpolders wordt ingericht voor waterberging bij extreme neerslag, het peil in het hele veengebied wordt verhoogd tot 20 – 40 cm onder maaiveld Op de hoge zandgronden worden alleen waterconserveringsmaatregelen uitgevoerd rondom natuurgebieden en op vrijwillige basis door agrariërs.

In de doorsnede is de situatie over ongeveer 30 jaar (2050) weergegeven. De veenoxidatie wordt wel vertraagd, maar is niet gestopt door de verhoging van de peilen tot 20-40 cm onder maaiveld. Door de daling van het maaiveld worden de peilen in het veengebied telkens weer verder verlaagd om voldoende drooglegging te houden voor de melkveehouderij. Door de maaivelddaling moeten de keringen langs de boezem wordt verbreedt en versterkt. De kwel vanuit de boezem (inclusief de Friese meren) neemt steeds verder toe, omdat het waterpeil steeds verder boven het dalende maaiveld komt te liggen. Door het dalende maaiveld en de toegenomen kwel moet er geïnvesteerd worden in nieuwe, grotere poldergemalen. Doordat niet in alle diepe veenpolders de peilen worden verhoogd en slecht een deel wordt ingezet als tijdelijke berging van water bij extreme neerslag wordt er nog steeds flink aan de grondwaterstroming vanuit de hoge zandgronden getrokken. Het effect van de waterconserveringsmaatregelen rondom natuurgebieden heeft alleen lokaal invloed op de grondwaterstand. Met deze "halve" maatregelen kan niet worden voorkomen dat de grondwaterstand op de zandgronden daalt en dat de kwel naar de lage delen van Fryslân toeneemt.

Door het steeds verder dalende maaiveld en de steeds lagere peilen neemt ook de toestroom van zout grondwater richting het lage midden toe.

Bij doorzetting van deze "halve" maatregelen op de lange termijn is het effect op het watersysteem gelijk aan het effect van de denklijn "geen keuzes maken" (figuur 35). Het duurt alleen langer voor dit eindbeeld bereikt wordt, omdat de veenoxidatie wel wordt vertraagd.

De gevolgen van het verdwijnen van het veen worden door klimaatverandering versterkt. Door de zeespiegelstijging neemt de stroom van zoutwater richting het lage midden toe en kan verder Fryslân binnen dringen. Door langere droge perioden dalen de grondwaterstanden op de hogere zandgronden nog verder, waardoor de waterbehoefte op de zandgronden toeneemt. Dit zou kunnen leiden tot extra grondwateronttrekkingen ten behoeve van beregening, waardoor het effect van de dalende grondwaterstanden wordt versterkt.

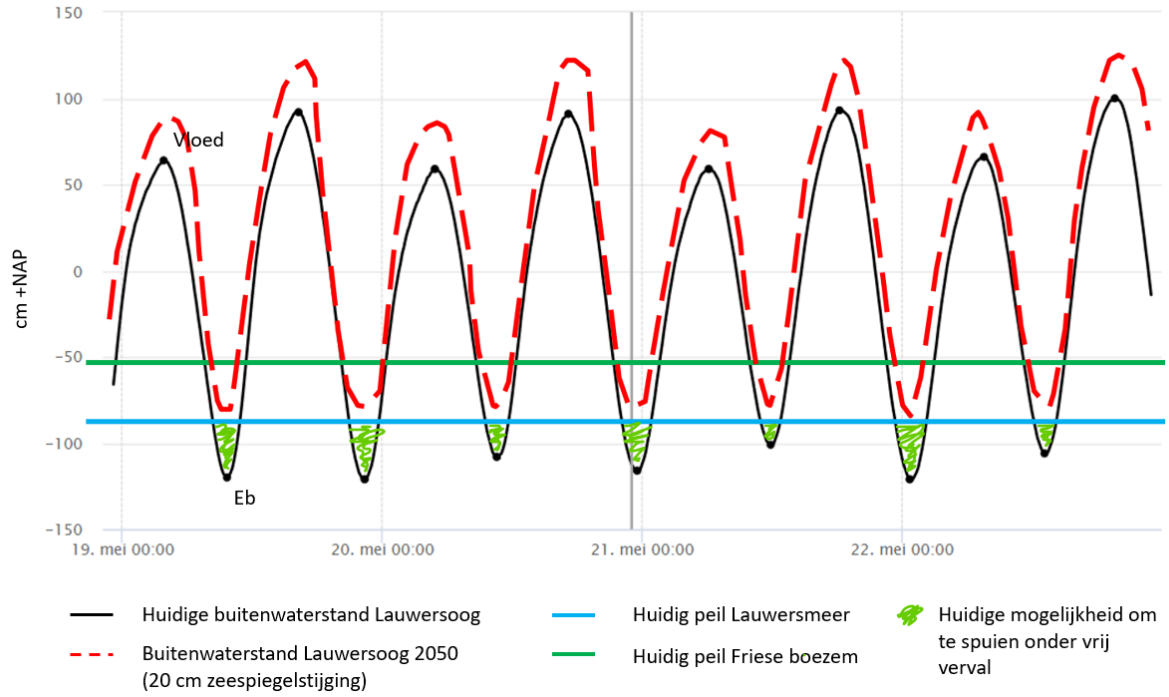
### Toekomstige veranderingen in het oppervlaktewatersysteem

*Zeespiegelstijging*

Klimaatverandering en autonome ontwikkelingen hebben ook invloed op het oppervlaktewatersysteem in Fryslân.

Op dit moment is Fryslân nog voor een groot deel afhankelijk van de vrije afvoer naar de Waddenzee en het Lauwersmeer. Het Lauwersmeer voert het te veel aan water via de R.J. Cleveringsluizen op Lauwersoog onder vrij verval af richting de Waddenzee. Er kan alleen tijdens laag water gespuid worden via de sluizen. Door zeespiegelstijging wordt de afvoer onder vrij verval steeds kleiner, omdat het waterstandsverschil tussen de zee en de boezem of het Lauwersmeer steeds kleiner wordt. Ook de periode (het spuivenster) waarin gespuid kan worden, wordt steeds korter. In figuur 43 wordt het effect van de zeespiegelstijging op de spuimogelijkheden op het Lauwersmeer geïllustreerd. De zwarte lijn is het huidige getij, de blauwe lijn is het huidige peil op het Lauwersmeer. Als de zeewaterstand lager wordt dan de waterstand op het Lauwersmeer kan water worden afgevoerd (de groene vlakjes). Met de rode stippellijn is de zeewaterstand bij 20 cm zeespiegelstijging weergegeven. Onder normale omstandigheden kan niet meer onder vrij verval gespuid worden bij Lauwersoog.

Het peil van de Friese boezem ligt hoger dan het peil op het Lauwersmeer, maar het laagwater bij Harlingen is hoger dan bij Lauwersoog. Dit betekent dat ook de afvoer bij Harlingen sterk afneemt door de zeespiegelstijging.




*Figuur 43. Effect van zeespiegelstijging op de spuimogelijkheden*

*Extreme neerslag*
Door de klimaatverandering neemt de hoeveelheid regen die er valt toe (zie bijlage 2). Dit geldt zowel voor de winter als voor de zomer. In de zomer komt dit vooral door buien die langdurig op één locatie blijven hangen en daar uitregenen. In de zomer van 2022 was dit de oorzaak van de wateroverlast in Limburg, België en Duitsland. Ook in Fryslân zijn er verschillende voorbeelden van wateroverlast door extreme buien.

Als er veel regen valt dan komt dit het eerst in de sloten van de polders en de zandgronden. Vanaf de zandgronden stroomt dit regenwater via de greppels en sloten naar de beken, die het water snel naar de Friese Boezem afvoeren. Vanuit de polders pompen gemalen het water ook naar de Friese Boezem. Door de beperkte afvoercapaciteit van de gemalen (ca. 12 mm per dag) moet een deel van het water in de polders worden geborgen. Omdat er niet voldoende ruimte voor het water is kunnen de laagste delen van de polders onder water lopen.

Gemalen en beken voeren  de regen af de Friese Boezem. De beken en gemalen voeren ook nu al meer water af naar de boezem dan de boezem af kan voeren naar het Lauwersmeer, de Waddenzee en het IJsselmeer, waardoor de boezemwaterstand stijgt. Als de boezemwaterstand te hoog wordt en het water over de regionale keringen dreigt te stromen, worden eerst de bergingsgebieden ingezet. Dit zijn gebieden die speciaal zijn ingericht om water tijdelijk op te slaan. Als de inzet van bergingsgebieden niet voldoende is om de waterstandstijging te beperken wordt een maalstop ingesteld. Dit betekent dat de poldergemalen worden uitgezet en geen water meer naar de boezem wordt afgevoerd vanuit polders. Het overtollige regenwater moet dan in de polder worden vastgehouden. Dit leidt tot wateroverlast in de polders, doordat de laagste delen van de polder onder water komen te staan. Ook de afvoer van de beken wordt door de hoge boezemwaterstanden beperkt, waardoor de laagste delen langs de beek onder water lopen en hier wateroverlast ontstaat. Door zeespiegelstijging kan het boezemsysteem minder water afvoeren(zie bij zeespiegelstijging) . Hierdoor lopen de waterstanden op de Friese Boezem vaker en sneller op bij overvloedige neerslag. Zonder aanpassingen in het huidige systeem neemt de wateroverlast door klimaatverandering en zeespiegelstijging toe.

Extreme neerslag zorgt ook lokaal voor problemen. In de zandgronden stroomt de neerslag naar de lokale laagtes. Deze laagtes hebben vaak een kleine bemaling om voldoende drooglegging voor landbouw te realiseren. De capaciteit van deze bemalingen is niet afgestemd op toestromen regenwater van buiten het bemalen systeem, waardoor in deze laagtes wateroverlast optreedt. In andere gebieden ontstaat door de geringe berging in het oppervlaktewatersysteem ook overlast door hoge polderpeilen en inundatie van de laagste delen. Ook beken kunnen buiten hun oevers treden, doordat de afvoercapaciteit bij extreme neerslag niet voldoende is.

*Extreme droogte*
In de zomer is Fryslân afhankelijk van de aanvoer van zoet water uit het IJsselmeer. Door de klimaatverandering verandert de Rijn steeds meer van een smeltwater rivier naar een regenwater rivier, waardoor de afvoer van de Rijn grilliger wordt. In droge perioden voert de Rijn minder zoet water naar het IJsselmeer, terwijl de watervraag vanuit de gebieden rondom het IJsselmeer juist toeneemt. Uit de stresstest voor het IJsselmeer blijkt dat bij extreme droogte het IJsselmeer niet voldoende water kan leveren aan de omliggende gebieden.

Tegelijkertijd neemt door de toenemende warmte de verdamping van water uit zowel de Friese Boezem als de polders toe. Er is dus meer water nodig om de polderwaterstanden op peil te houden. Bij een tekort op het IJsselmeer, kan niet genoeg water worden inlaten om alle polders en de Friese boezem op peil te houden. Een lage boezemwaterstand levert beperkingen op voor de scheepvaart.

Door de dalende waterstand op de Friese Boezem en de droogte neemt de waterstand in de veenkaden langs de Friese Boezem af. Hierdoor droogt de (veen)grond in de polderkade uit en kan de polderkade afschuiven (zoals in Wilnis in de zomer van 2003). Over de ontstane laagte stroomt er vervolgens boezemwater de achterliggende veenpolder in en veroorzaakt daar wateroverlast. Verder leidt watertekort tot schade aan landbouwgewassen en natuur.

Ook ontstaat er door hitte en droogte een grotere watervraag voor het doorspoelen van de boezem en de polder ten behoeve van de waterkwaliteit en de verziltingsbestrijding in het noordelijk kleigebied.

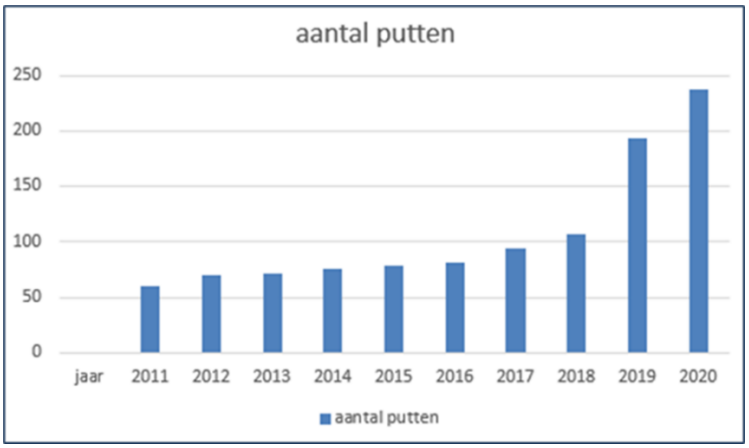
Door extreme droogte dalen de grondwaterstanden in de polders en op de zandgronden, waardoor de vraag naar water voor beregening vanuit de landbouw toeneemt. Bij verminderde aanvoer vanuit het IJsselmeer is er niet voldoende water beschikbaar om aan deze vraag te voldoen. Om het uitzakken van de waterstanden in de polder zo lang mogelijk uit te stellen wordt een beregeningsverbod vanuit het oppervlaktewater ingesteld. Ook de aanvoer van water naar de hoge zandgronden wordt dan beperkt. Hierdoor zal er schade voor landbouw en natuur ontstaan. In de veenweidegebieden zal door het lagere slootpeil en dalende grondwaterstanden een toename van de oxidatie van veen plaatsvinden. Dit leidt tot extra uitstoot van broeikasgassen en een snellere maaiveldaling. Ook kan in veen- en kleigebieden schade aan infrastructuur en bebouwing optreden.

Doordat tijdens extreme droogte niet voldoende water beschikbaar om door te spoelen neemt de watertemperatuur toe en neemt de waterkwaliteit af, waardoor vaker blauwalgen en vissterfte optreden.

Tijdens droge perioden neemt de watervraag voor de verziltingsbestrijding in het noorden van Fryslân toe. De zoetwaterlens in de percelen wordt dunner en de zoute kwel van onderaf neemt door zeespiegelstijging toe. Wanneer er tekorten optreden op het IJsselmeer kunnen de sloten niet meer worden doorgespoeld. Zeespiegelstijging en droogte leiden dus tot een toename van de verzilting in de noordelijke kleischil.

De zandgronden krijgen vaker te maken met extreem lage grondwaterstanden met schade voor landbouw en natuur. De kwelstroom van de hoger gelegen flanken richting de beekdalen neemt verder af en daarmee neemt de biodiversiteit in de beekdalen ook verder af.

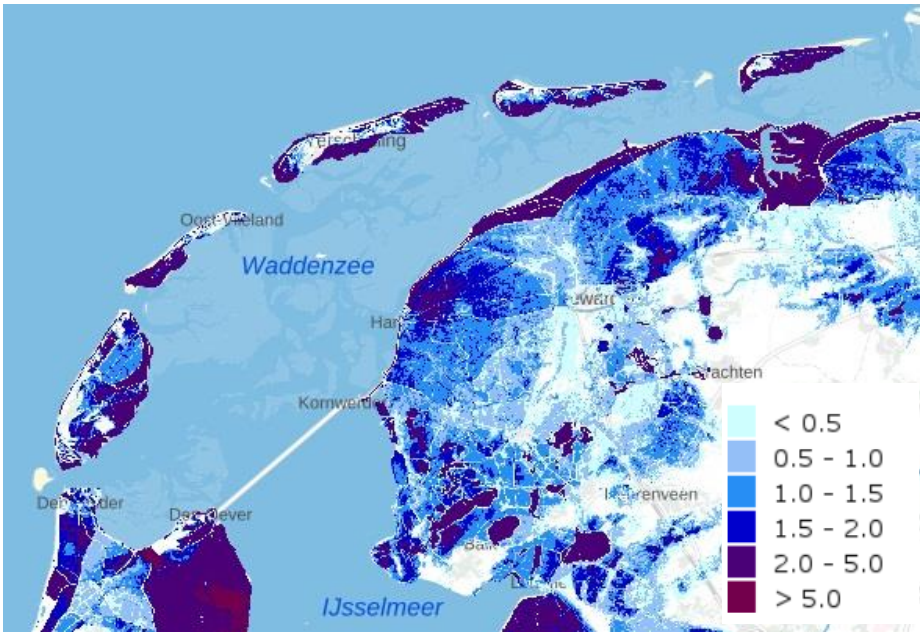
Door de lage grondwaterstanden op de zandgronden neemt in de landbouw de vraag naar beregening toe. Zeker door de toename van akkerbouw en tuinbouw op de zandgronden. Dit blijkt ook uit de toename van het aantal grondwateronttrekkingen voor beregening. Na de droge zomer van 2018 is het aantal grondwaterputten, voornamelijk op de zandgronden verdubbeld (zie figuur 44). Het effect op de grondwaterstand in de omgeving van de putten is nog redelijk beperkt en de grondwatervoorraad kan gedurende de winter weer worden aangevuld. Bij nog een verdubbeling van grondwateronttrekkingen worden de invloedsafstanden groter, dus is effect in een groter gebied rondom de onttrekking merkbaar. Het duurt dan ook langer dat de grondwatervoorraad weer is aangevuld en in een relatief droge winter kan de grondwatervoorraad zich niet meer herstellen voor de volgende zomer, waardoor er roofbouw geplaagd wordt op de grondwatervoorraad.




*Figuur 44: Ontwikkeling van het aantal grondwateronttrekkingen t.b.v. beregening in Fryslân (bron Wetterskip Fryslân)*

## Ontwikkeling van de waterveiligheid

De buitengrenzen van het vaste land van Fryslân worden gevormd door onze dijken. Als de zeespiegel stijgt en onze dijken, duinen en sluizen niet worden aangepast dan neemt de kans op overstroming toe en de grootte van het overstroomde gebied toe. Dit betekent dat er met een zeespiegelstijging van ongeveer 1 m in 2100 er één meter meer water komt te staan in Fryslân ten opzichte van het huidige overstromingsbeeld (zie figuur 45, bron: LIWO).




*Figuur 45: Maximale waterdiepte in Fryslân bij een dijkdoorbraak (Bron: LIWO)*

In essentie betekent dit dat dan alleen de hoge delen van de duingebieden op de Waddeneilanden, de Noordelijke Fryske Walden, Gaasterland en de zandgronden in het Zuidoosten hoger dan het overstroomde gebied zullen liggen.

Door zeespiegelstijging neemt de waterdiepte en daarmee de golfenergie die vanaf de Noordzee de Waddeneilanden bereikt toe. Dit betekent meer duinafslag langs de kusten van de Waddeneilanden bij storm. Hierdoor zullen de smalle delen van de duinwaterkeringen niet voldoende zand bevatten.

De Noordzeekust van de Waddeneilanden en de platen in de Waddenzee absorberen voor een deel de golfenergie vanaf de Noordzee.  Als de zeespiegel fors stijgt en er niet genoeg zand en slib voor de

Waddenzee beschikbaar is, kan een deel van de platen in de Waddenzee niet neer meegroeien. Dan neemt de golfenergie waar onze dijken op het vaste land en eilanden tegen moeten kunnen toe en zullen onze dijken niet stevig genoeg blijken te zijn.

### Drinkwaterwinning

De drinkwaterwinning zal door droge en hete zomers hoge pieken kennen, juist op het moment dat de grondwaterstanden ver uitzakken. Dit hebben we al gezien in de droge zomers van de afgelopen jaren. Dit heeft vooral bij de winningen op de zandgronden een negatief effect. Daarnaast lopen een aantal drinkwaterwinningen in Fryslân een risico op verzilting in de toekomst.

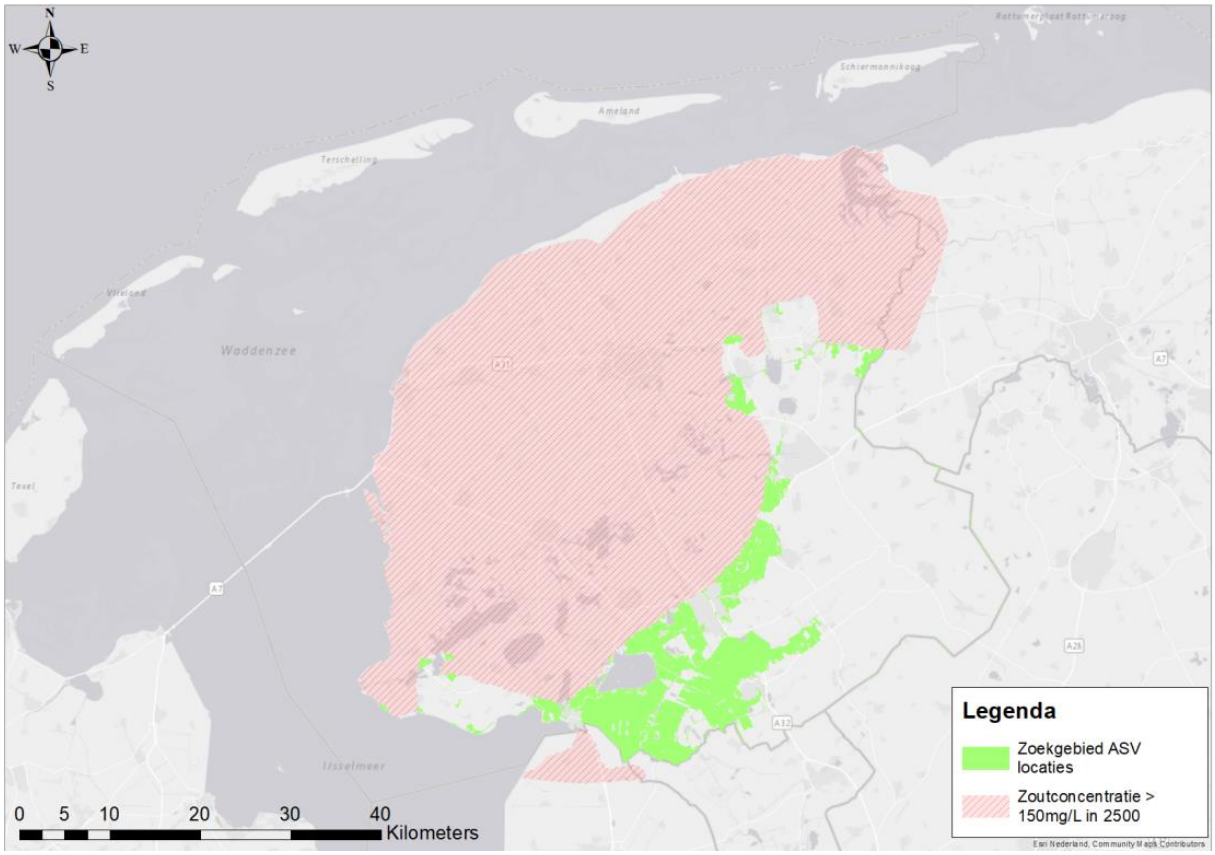
De Strategische grondwaterstudie Fryslân (2019) heeft inzicht gegeven in verziltingsrisico's van drinkwaterbronnen. Voor de concrete winningen op de vaste wal gaat het daarbij om drie winningen waar op de lange termijn verziltingsrisico's spelen (Garyp, Noardburgum, Oudega). Daarnaast komen er uit metingen in de pompputten signalen dat de winning Nij Beets ook wel eens met oplopende chlorideconcentraties te maken kan krijgen. De totale wincapaciteit waar tot het jaar 2100 enig risico op verzilting speelt, is maximaal ruim 24 mln. $m^3$ per jaar (exclusief de Waddeneilanden).

Om voor de toekomst de drinkwatervoorziening veilig te stellen, worden door de provincie Aanvullende Strategische Voorraden (ASV's) aangewezen en beschermd conform de landelijke afspraak voortvloeiend uit het STRONG. Belangrijke redenen hiervoor zijn de toenemende druk op de ondergrond, de langdurige trajecten voor het realiseren van een winning en de stijgende drinkwatervraag. In de Drinkwaterstrategie Fryslân 2050 zijn deze ASV's aangewezen. De omvang van de ASV's anticipeert op een potentiële sterke stijging van het drinkwaterverbruik enerzijds en de risico's van verziltingsdruk voor bestaande drinkwaterwinningen anderzijds. Het gaat voor Fryslân om 12,5 miljoen $m^3$ per jaar voor de stijging van de drinkwatervraag tot 2050. Daarnaast is 24 miljoen $m^3$ per jaar bij huidige winningen als risicovol voor verzilting aangemerkt tot het jaar 2100. In totaal wordt door de provincie voor de periode tot 2050 een ASV-zoekgebied vastgelegd en beschermd dat voldoende groot is voor ongeveer 30 miljoen $m^3$ per jaar aan potentiële drinkwaterbronnen.

De Strategische Grondwaterstudie Fryslân (2019) en de Bronnenstudie van Vitens (2008) vormen de basis voor positionering van ASV's op de best mogelijke plekken in het grondwatersysteem met de minste invloed op de grondwaterstand en vrij van verzilting tot in lengte van jaren. Deze plekken zijn in figuur 46 groen gekleurd.

Natuurgebieden en stedelijke gebieden zijn als zoekgebied buiten beschouwing gelaten. Ook zandgronden zijn in eerste instantie buiten het zoekgebied van de grondwaterstudie gelaten. Dit omdat in algemene zin de invloed van een winning op de omgeving in zandgebieden groter is dan in veengebieden. Een nieuwe drinkwaterwinning mag niet leiden tot een toename van de verdroging van waardevolle, grondwaterafhankelijke natuurgebieden (laagveenmoerassen) en mag geen significante toename van droogte veroorzaken in het betreffende gebied. Door het toepassen van mitigerende maatregelen kan dit grotendeels worden voorkomen.

Uit de grondwaterstudie is daarnaast gebleken dat een grondwateronttrekking in de omgeving van een boezemsysteem (Friese meren), in combinatie met een bepaalde opbouw van de ondergrond, de effecten van een onttrekking sterk kunnen verkleinen. Het realiseren van een nieuwe drinkwaterwinning in combinatie met uitbreiding van de Friese boezem lijkt daarom vanuit hydrologisch perspectief kansrijk.




*Figuur 46: Globaal zoekgebied ASV (bron: Strategische grondwaterstudie Fryslân)*

## Waterkwaliteit

De voorziene ontwikkelingen zelf en de wijze waarop het waterbeheer hier op wordt aangepast kunnen grote impact hebben op de ecologische waterkwaliteit. Effecten van klimaatverandering kunnen directe en indirecte effecten hebben. Een direct effect is bijvoorbeeld dat de watertemperatuur stijgt. Hierdoor komen koudeminnende soorten meer onder druk te staan en hebben warmteminnende soorten voordeel. Ook kunnen er nieuwe soorten een plek in Fryslân vinden. Een hogere watertemperatuur zorgt er voor dat fysisch-chemische processen in het water en in de waterbodem anders kunnen verlopen. Dit zal effect hebben op de ecologische kwaliteit. Mogelijk moeten de doelen van de Kaderrichtlijn Water hierop worden aangepast.

Een indirect effect is bijvoorbeeld dat door een ander neerslagpatroon de belasting van het water met voedingsstoffen periodiek hoog kan zijn. Als het langere tijd niet regent, droogt de bodem uit. De bodem neemt vervolgens slecht water op. Als het vervolgens gaat regenen en zeker bij piekbuien, zal er relatief veel water afstromen over het oppervlak en zo direct in het oppervlaktewater terechtkomen. Deze route zorgt voor extra ongewenste stoffen in het water: meer voedingsstoffen, meer milieuvreemde stoffen en meer slib (meegespoelde bodemdeeltjes).

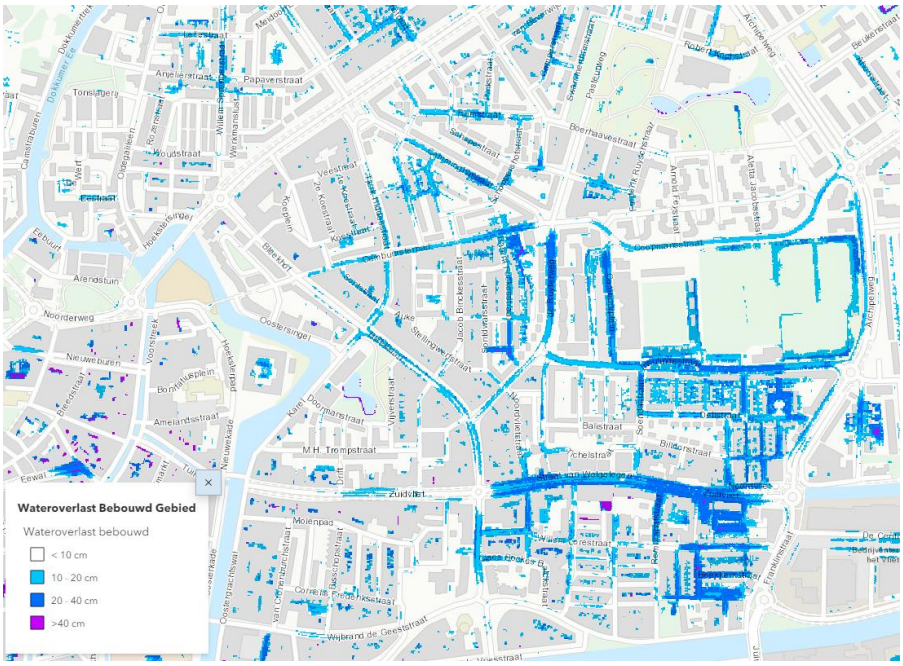
De verhoogde inlaat van IJsselmeerwater om de waterkwaliteit te verbeteren is een tijdelijke maatregel. Op termijn moet de inlaat, door lagere belasting vanuit Fryslân zelf, niet meer nodig zijn. We verwachten dat in de toekomst de hoeveelheid water vanuit het IJsselmeer sterk minder wordt. Dan is inlaat voor waterkwaliteit waarschijnlijk niet meer mogelijk. Het is dus zaak om de belasting van het oppervlaktewater in Fryslân zelf te verminderen.

## Bebouwd gebied

In bebouwd gebied leidt klimaatverandering tot een toename van het risico op overlast en schade.

Door een hoosbui kunnen (lokaal) in bebouwd gebied straten en tuinen onderlopen en kan zelfs neerslagwater in huizen komen. Dit komt omdat in bebouwd gebied veel stenen liggen en weinig slootjes. Niet zelden zijn sloten en greppels in bebouwd gebied bij stedelijke (her)ontwikkelingen gedempt, waardoor de afwatering en bergingscapaciteit in het watersysteem negatief beïnvloed en ontoereikend is bij extreme buien. Het rioleringsstelsel kan ook maar een deel van het regenwater afvoeren. De rest stroomt over het maaiveld naar de lagere delen in bebouwd gebied.

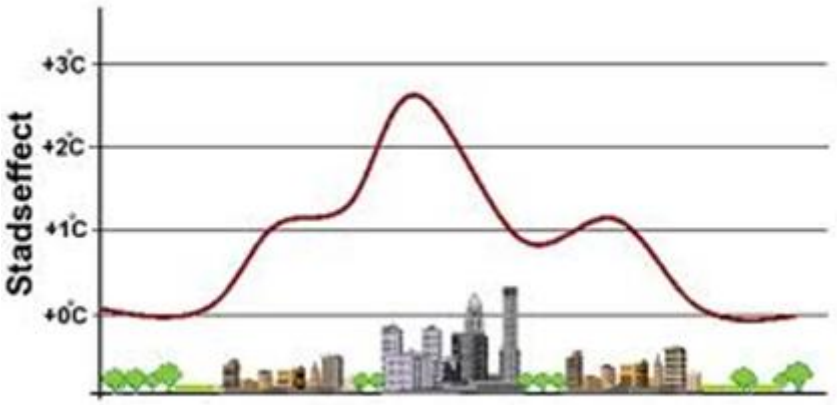
Hoe groot de schade is na een hoosbui hangt af van wat zich in die lagere delen bevindt. Tijdelijk water op straat en een plas water op een grasveldje is misschien wel hinderlijk maar leidt niet direct tot schade. Het wordt anders als er op die lage plek een elektriciteitskastje staat. Door het water kan kortsluiting ontstaan en kan de stroom in een hele wijk uitvallen. Ook tunnels en aquaducten kunnen vollopen en zorgen voor verkeersopstoppingen. Hierdoor kunnen hulpdiensten niet snel op een locatie komen. In figuur 47 staat een voorbeeld van de berekende wateroverlast in Leeuwarden bij een extreme bui (60 mm in 1 uur).




*Figuur 47: Wateroverlast bij een bui van 60 mm in een uur (Leeuwarden) – bron: Friese klimaatatlas*

Ook droogte kan leiden tot schade door verzakkingen van gebouwen en infrastructuur en aantasting van houten paalfunderingen.

Door klimaatverandering wordt het warmer. Niet alleen de gemiddelde temperatuur stijgt, ook de extremen nemen toe. Extreme hitte brengt gezondheidsrisico’s met zich mee. Blootstelling aan hoge temperaturen kan zorgen voor gezondheidsrisico's. Hittestress is een serieus probleem dat vaak onderschat wordt. Langdurig aanhoudende hitte kan leiden tot klachten als vermoeidheid, concentratieproblemen en hoofdpijn. Er bestaat ook risico op uitdroging en oververhitting van het lichaam. In het ergste geval kunnen mensen hieraan overlijden. In Nederland stijgt tijdens hittegolven de sterfte met 12 procent. In de stad is het vaak warmer dan in het omringende landelijk gebied. Dit wordt het stadseffect of stedelijk hitte-eiland effect genoemd (zie figuur 48). Dit effect is 's nachts het sterkst omdat de stad de warmte langer vasthoudt.




*Figuur 48: Temperatuurverschil tussen stedelijk gebied en platteland*

Hogere luchttemperaturen leiden tot hogere watertemperaturen. En dat kan negatieve gevolgen hebben voor de waterkwaliteit. En als het al lang droog is, kan het door de hitte extra droog worden omdat er meer water verdampt.

# Bronnenlijst

De wereld van het Friese landschap door M. Schroor, 1993

Werkboek verkenning BOVI Wetterskip Fryslân, H+N+S Landschapsarchitecten, 2021

Veenweideprogramma 2021-2030, Achtergronddocument, maart 2021, Provincie Fryslân en Wetterskip Fryslân

o+bnNatuurkennis, https://www.natuurkennis.nl/landschappen/beekdallandschap/beekdallandschap/landschapsecologie/

Sander Peters, Drinkwater op een eiland: van vér halen of zelf maken, H2O, nr. 11 2013

Bakker, T.W.M. (1981). Nederlandse kustduinen. Geohydrologie. Proefschrift Landbouwhogeschool Wageningen. Pudoc, Wageningen.

*www.grondwaterformules.nl*

RHDHV, 2022

Deltares, 2022

Grondwateratlas van Fryslân, Provincie Fryslân. Wetterskip Fryslân en Vitens, 2019

*LIWO*

*Strategische grondwaterstudie Fryslân*

## Bijlage 1: Drinkwaterwinningen en leidingnetwerk



## Bijlage 2: Klimaatverandering

In het zesde rapport van het IPCC, het klimaatpanel van de Verenigde Naties, dat in augustus 2021 is verschenen, geeft het IPCC aan dat dat de opwarming van de aarde door de mens is veroorzaakt. Ook concludeerde het klimaatpanel dat elke 0,5°C extra opwarming leidt tot een merkbare toename in extreem weer. Omdat minder dan 1,5°C opwarming inmiddels buiten bereik is, zullen deze risico's de komende decennia verder toenemen. Op basis van het zesde rapport van het IPCC aangevuld met waarnemingen en onderzoek van het KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) is in het Klimaatsignaal'21 een tussentijdse stand van zaken voor Nederland beschreven. Onderstaande beschrijving van de klimaatverandering is op het Klimaatsignaal'21 gebaseerd.
Het KNMI brengt om de circa zeven jaar nieuwe klimaatscenario's uit. Medio 2023 wordt de volgende publicatie van klimaatscenario's voor Nederland verwacht.

**Zeespiegelstijging**

De toekomstscenario's laten een grotere zeespiegelstijging zien dan voorheen. Als we de uitstoot van broeikasgassen niet verminderen kan de zeespiegel voor de Nederlandse kust rond 2100 met 1,2 meter stijgen ten opzichte van begin deze eeuw. Als het smelten van de Antarctische IJskap op de Zuidpool versnelt, komt zelfs de 2 meter zeespiegelstijging in 2100 in zicht. In 2014 berekende het KNMI dat in 2100 de grens 1 meter zou zijn. De berekende zeespiegelstijging is nu dus naar boven bijgesteld. Op de lange termijn wordt het verschil in zeespiegelstijging tussen niets doen aan de uitstoot van broeikasgassen en het voldoen aan het Klimaatakkoord van Parijs zeer groot. In 2300 kan dit verschil al oplopen tot vele meters.

In deze Blauwe Omgevingsvisie zijn we in de onderstaande beschrijving van de effecten van klimaatveranderingen op het water- en bodemsysteem uitgegaan van de in 2014 berekende zeespiegelstijging. In de visie hebben we wel mee laten wegen dat de zeespiegelstijging mogelijk groter wordt.

**Stormen**

Orkanen die bij Bonaire, St Eustatius en Saba, de zogeheten BES-eilanden, voorkomen, nemen in kracht toe met gemiddeld meer neerslag. Restanten van deze tropische orkanen kunnen ook Europa en de Noordzee bereiken en gaan gepaard gaan met veel wind en neerslag.

Het is niet de verwachting dat het aantal stormen op de Noordzee toeneemt. Nieuw onderzoek van het KNMI laat geen toename zien van de windsterkte op de Noordzee en de daarmee gepaard gaande stormvloeden.

**Lente en zomer: Langdurige droogte/hitte en extremere zomerbuien**

Uit nieuw onderzoek van het KNMI blijkt dat de zwaarste zomerbuien extremer worden, waarbij ook de kans op valwinden toeneemt. Naast de extreme buien kent de Nederlandse zomer ook een ander gezicht: dat van droogte. De kans op droge lentes en zomers is groter geworden. In het binnenland komt deze toename door klimaatverandering. Ons klimaat schuift steeds meer richting het klimaat van Zuid-Europa op.

De sterkere opwarming van het noordpoolgebied speelt mogelijk een rol in de grotere kans op langdurige droogte of hitte. We kunnen namelijk langer met hetzelfde weertype te maken krijgen doordat de straalstroom (baan met hoge windsnelheden op circa 10 kilometer hoogte) mogelijk

zwakker wordt door een afname van het temperatuurverschil tussen pool en tropen. Hoe trager de straalstroom meandert, hoe groter de kans dat hetzelfde weerbeeld langer blijft bestaan. Dit geldt zowel voor droogte/hitte als voor extreme zomerneerslag. De drie droge zomers van 2018 , 2019 en 2020 en de  extreme neerslag en de overstromingen in Duitsland, België en Limburg in de zomer van 2021 zijn hier al een voorbeeld van.

**Stedelijk klimaat**

Steden zijn meestal warmer dan de landelijke omgeving. Door de opwarming van de aarde wordt het in steden nog warmer. Daarnaast vormen extreme neerslag en droogte een steeds grotere uitdaging voor de stad.

**Rivieren en IJsselmeer**

’s Zomers neemt de kans op laagwater in de rivieren toe, terwijl in de winter juist de kans op hoogwater toeneemt. De rivier de Rijn bepaalt de hoeveelheid water in het IJsselmeer. Uit de stresstest IJsselmeer blijkt dat er door een verminderde Rijnafvoer vaker watertekorten in het IJsselmeer zullen optreden. Er zal niet meer voldoende zoet water beschikbaar zijn, waardoor er keuzes gemaakt moeten worden wie wel en wie geen water krijgt.

## Bijlage 3: Samenvatting reactie peer review grondwaterstudie

# Samenvatting reactie op de peer review en herberekeningen Brede Grondwaterstudie Fryslân

# 1. Inleiding

### 1.1. Aanleiding

In 2019 is de Brede Grondwaterstudie Fryslân opgeleverd (RHDHV, 2019). Dit is een door Royal Haskoning (hierna RHDHV) uitgevoerde modelstudie voor het vasteland van Fryslân. Doel van deze studie was de effecten van klimaatverandering, zeespiegelstijging en bodemdaling op het grondwatersysteem van Fryslân te onderzoeken. Daarbij is gekeken naar grondwaterstanden, grondwaterstroming, waterbalansen en naar (de verplaatsing van) chloride (zout) via het grondwater.

In oktober 2020 heeft LTO Noord aan Deltares opdracht gegeven om een peer review aan te leveren op de rapportage van de Brede Grondwaterstudie. Deze peer review is op 7 mei 2021 opgeleverd (Deltares, 2021).

Naar aanleiding van de peer review heeft RHDHV in opdracht van de provincie Fryslân met de aanbevelingen uit de peer review herberekeningen uitgevoerd en een rapportage opgeleverd (BH9643-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001, 10 jan. 2022).

Door Gedeputeerde Hoogland is aan Provinciale Staten toegezegd aan te geven op welke manier grondwaterstudie en de peer review doorwerkt in keuzes ten aanzien van het Friese waterbeheer, met speciale aandacht voor het Friese Veenweidegebied. Daarvoor is een notitie geschreven die een verantwoording is van de manier waarop Provincie Fryslân, Wetterskip Fryslân en Vitens als opdrachtgevers van de Brede Grondwaterstudie de peer review beoordelen, welke aanvullende berekeningen uitgevoerd zijn en wat het ons leert over het Friese watersysteem.

### 1.2. Positionering

De Strategische Grondwaterstudie Fryslân bestaat uit vier studies: een verkennende studie (Artesia, 2017), een inventarisatie van bestaande kennis (Hunzebreed, 2017), een ruimtelijke interpretatie van alle chloridemetingen (Deltares, 2017) en een 3D modellering voor heel Fryslân, aangeduid met ‘de Brede Grondwaterstudie’. De bevindingen van deze vier studies zijn beschreven in de Grondwateratlas van Fryslân (2019).

De peer review van Deltares gaat uitsluitend in op de rapportage van de Brede Grondwaterstudie: de modellering die door RHDHV is uitgevoerd. Deze kritische analyse kan in die zin beschouwd worden als een vijfde onderdeel van de Strategische Grondwaterstudie. De Provincie Fryslân heeft op drie onderdelen aanvullende berekeningen uit laten voeren. Tevens heeft RHDHV de gebruikte rekenmethode nog eens tegen het licht gehouden.

Als we de peer review beschouwen als de vijfde bouwsteen binnen de Strategische Grondwaterstudie Fryslân, kan de notitie (de verwerking van de peer review) beschouwd worden als een zesde bouwsteen. Daarmee is de Strategische Grondwaterstudie niet klaar. Het is een bouwwerk ‘in progress’, waaraan steeds nieuwe kennis en inzichten worden toegevoegd. Zo krijgen we steeds meer inzicht en kennis van het Friese grondwatersysteem, zodat we voor de toekomst van Fryslân de juiste beslissingen weloverwogen kunnen nemen.

# 2. Acties na peer review

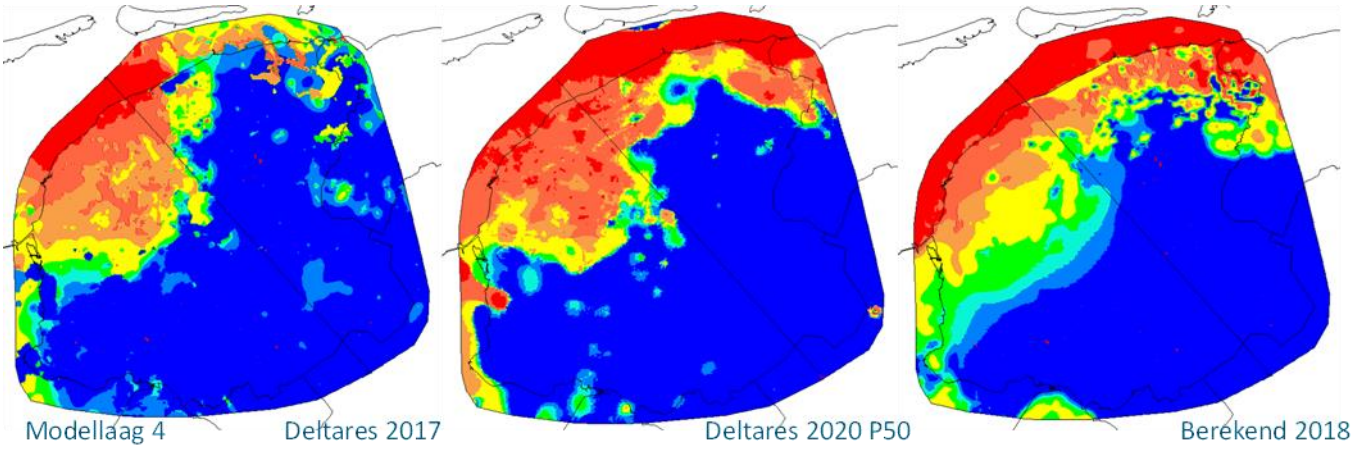
Na het ontvangen van de peer review zijn door de opdrachtgevers van de Grondwaterstudie Fryslân een aantal zaken onderzocht of opnieuw beschouwd. De resultaten hiervan zijn van belang om een gedegen reactie te geven op de peer review.

## 2.1. Beschouwing numerieke dispersie

Numerieke dispersie is een modelmatige ongecontroleerde menging van zout en zoet grondwater die veroorzaakt wordt door de toegepaste rekenmethode. Voor de Grondwaterstudie Fryslân is de Stroombanenmethode als grondwaterkwaliteitsmodel gebruikt. In de begeleidingsgroep van de grondwaterstudie is het risico van numerieke dispersie aan de orde geweest, maar omdat het Stroombanenmodel op andere plaatsen scherpe contrasten berekende, is geconcludeerd dat het in de Grondwaterstudie Fryslân geen dominante rol zou spelen.
Anno 2022 zien we dat toch wat anders: door de stroombanenmethode wordt voor sommige locaties te veel menging berekend. Op andere plaatsen blijft deze menging 'beheerst'. Deltares stelt daarom dat het grondwaterkwaliteitsmodel SEAWAT gebruikt had moeten worden, waarbij een rekenmethode zonder numerieke dispersie toegepast kan worden.

## 2.2. Nieuwe 3D interpretatie

Zoals in § 1.2 aangegeven heeft kennisinstituut Deltares in het kader van de Grondwaterstudie Fryslân en in opdracht van de provincie Fryslân in 2017 een ruimtelijke interpretatie van alle chloridemetingen uitgevoerd (Deltares, 2017). Drie jaar later, in 2020, dus na oplevering van de Grondwaterstudie Fryslân, leverde Deltares via het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) een nieuwe 3D-interpretatie op van alle beschikbare metingen, maar dan voor heel Nederland (Deltares en Arcadis, 2020). Die nieuwe interpretatie ziet er voor Fryslân toch wat anders uit dan de in 2017 opgeleverde interpretatie ten behoeve van de Grondwaterstudie Fryslân (zie onderstaande kaartbeelden). Op de kaart rechts (Berekend 2018) zien we de chlorideverdeling zoals deze in 2018 is berekend in de grondwaterstudie aan de hand van het Stroombanenmodel. Met name voor noordoost Fryslân komen de berekeningen met het Stroombanenmodel meer overeen met de inventarisatie uit 2020 dan de inventarisatie van Deltares uit 2017. De begeleidingsgroep van de Grondwaterstudie Fryslân had in 2018 al twijfels bij de inventarisatie van Deltares. Daarom is er destijds voor gekozen om de rekenresultaten van de Stroombanenmethode te gebruiken als referentiesituatie en niet de inventarisatie van Deltares. Op basis van deze referentiesituatie zijn de toekomstige scenario's (de zogenaamde Elementen) doorgerekend.




### 2.3. Aanvullende berekeningen

In de peer review worden drie aspecten genoemd die aanleiding waren om aanvullende berekeningen uit te voeren.

1. aanbeveling om niet met de Stroombanenmethode te rekenen, maar met het grondwaterkwaliteitsmodel SEAWAT. Tijdens de uitvoering van de Grondwaterstudie in 2018 bleek dit tot onoverkomelijke problemen te leiden (instabiliteit van het rekenprogramma en zeer lange rekentijden). Inmiddels geven snellere rekencomputers de mogelijkheid om alsnog met SEAWAT een met de grondwaterstudie vergelijkbare berekening uit te voeren van het referentie-scenario. In mei 2021 is daarom besloten om alsnog aanvullende berekeningen met SEAWAT uit te voeren voor het referentiescenario (met klimaatscenario Gh).
2. een berekening uit te voeren waarbij vanaf 2015 niet gerekend wordt met het berekende resultaat, maar met de 3D-interpretatie van Deltares van gemeten chlorideconcentraties voor het jaar 2015 (Deltares, 2017).
3. Deltares geeft in de peer review aan dat voor het begin van de historische reconstructie van het grondwatersysteem, de zogenaamde paleo-reconstructie, te zoete aannames gedaan zijn voor het ondiepe grondwatersysteem, en te zoute aannames voor het diepe grondwatersysteem. We hebben daarom de begin-aannames aangepast volgens de aanbevelingen van Deltares. Aan de hand van deze aanvullende berekening kunnen we vaststellen of dit tot wezenlijk andere uitkomsten leidt in de referentiesituatie (2015).

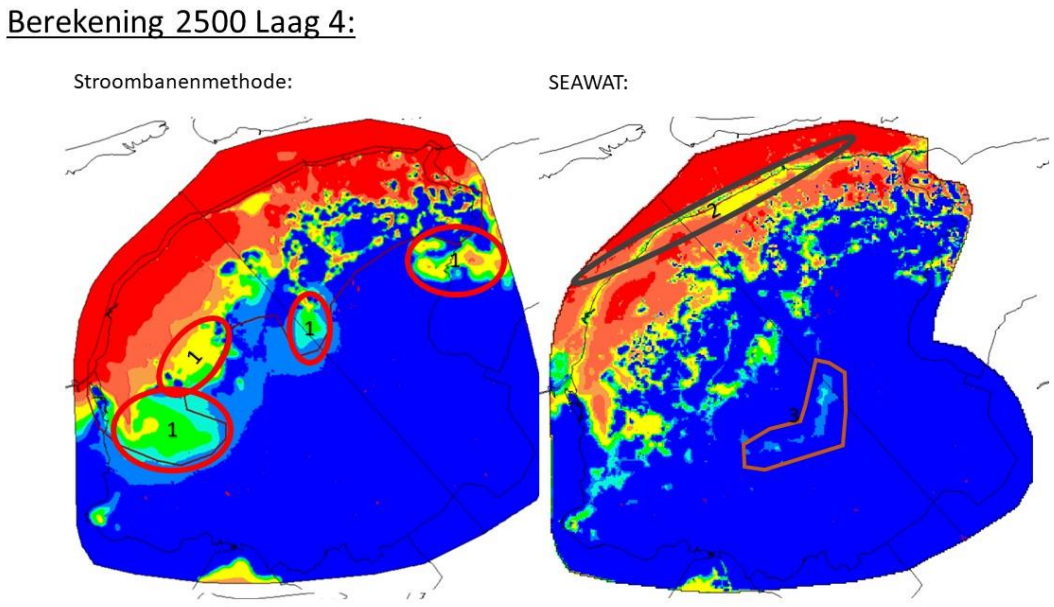
## 3. Belangrijkste conclusies

Uit de herberekeningen volgt de hoofdconclusie dat: *Eventuele keuzen voor een andere beginwaarde voor de scenarioberekeningen en/of toepassing van SEAWAT in plaats van de stroombanenmethode zouden niet tot wezenlijk andere conclusies hebben geleid dan welke eerder zijn geformuleerd in de Brede Grondwaterstudie Fryslân*.

In onderstaande paragrafen wordt de hoofdconclusie toegelicht op de drie onderdelen zoals in paragraaf 2.3 benoemd.

### 3.1. SEAWAT-berekening

- Beide methoden (zowel SEAWAT als de Stroombanenmethode) laten zien dat de instroom van zout grondwater op diepte traag maar gestaag verder gaat, tot aan het laagste punt in het (grond)watersysteem (het veenweidegebied). Die instroom vindt vooral op diepte plaats en werkt van daaruit door naar boven. Bij SEAWAT reikt het brakke water zelfs nog wat verder richting het veenweidegebied dan bij de Stroombanenmethode.
- In Noordoost-Fryslân komen in de ondiepe laag de berekende beelden goed overeen. In West- en Midden-Fryslân zijn er verschillen: bij de stroombanenmethode ontstaan een paar vlekken met vage grenzen (ellipsen met 1 erin). Dit wordt veroorzaakt door numerieke dispersie (modelmatige ongecontroleerde menging van zout en zoet grondwater). Bij SEAWAT zien we een veel grilliger patroon met scherpere grenzen. Het is duidelijk dat SEAWAT geen last heeft van numerieke dispersie.
- SEAWAT berekent in de ondiepe en diepe laag langs de Waddenzeedijk een verzoeting van grondwater (ellips met 2 erin). Gezien de locatie, de berekende zeespiegelstijging en de bodemdaling is dit zeer onwaarschijnlijk is. Vermoedelijk is dit een artefact in SEAWAT.
- SEAWAT berekent in de ondiepe laag sporen zoutig/brak water die veel verder het veenweidegebied in reiken dan bij de stroombanenmethode (vlek 3).
- De berekeningen voor de diepe watervoerende laag bevestigen dit beeld. In het midden en westen van Fryslân vertoont de Stroombanenmethode vagere grenzen. Dat leidt er onder andere toe dat bij de Stroombanenmethode het zoutige water tot aan de winning Oudega reikt. SEAWAT geeft scherpere grenzen, maar de invloed van zout water reikt verder.




### 3.2. Gemeten waarden als startwaarden

De extra berekening is gedaan met de interpretatie van de chloridemetingen die in 2017 is opgeleverd door Deltares. Het chloridegehalte in de metingen is op grote diepte minder zout dan in de berekende beginsituatie maar reikt wel verder landinwaarts. Ondanks dat de beginsituatie duidelijke verschillen kent veranderen de kwel- en infiltratiepatronen er niet door. De verzilting vindt

bij beide berekeningen langs dezelfde routes plaats. Eenzelfde patroon is in de resultaten te herkennen.

### 3.3 Uitgangspunten paleo-berekening

De paleo-reconstructie had tot doel om de huidige chlorideverdeling in het grondwater te begrijpen. Daarvoor is getracht de historische ontwikkeling van het Friese grondwatersysteem te reconstrueren aan de hand van paleo-geografische kaarten (bodemvormende processen en verloop van zeespiegelstijging). Deze berekening zijn gestart in 5500 BC. Volgens Deltares zijn de gekozen waarden voor het Waddengebied te zoet en de diepe ondergrond te zout. Er zijn daarom aanvullend twee varianten doorgerekend om dit te verkennen. De resultaten van deze aanvullende berekeningen in lijn met de uitgangspunten van Deltares sluiten niet goed aan bij de huidige situatie. Het grondwatersysteem in het noordwesten van Fryslân wordt voor de referentiesituatie te zout berekend. In onderstaande figuur is het resultaat voor het dwarsprofiel noordwest – zuidoost weergegeven. Ondanks de lagere waarden ten opzichte van de eerste berekening, geeft ook deze aanpassing een duidelijk een te zout rekenresultaat. Het toepassen van de aanbevolen uitgangspunten van Deltares leiden dus niet tot een verbetering van de paleo-reconstructie.

