

TNO PUBLIEK

Geologische Dienst Nederland
Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56

TNO-rapport**TNO 2022 R10828****De geologie en hydrogeologie van Twente**

Datum	14 april 2022
Auteur(s)	M.A.J. Bakker F. Busschers M.W. van den Berg W.J. Zaadnoordijk
Aantal pagina's	54 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Provincie Overijssel
Projectnaam	Geologische en hydrogeologische beschrijving Twente
Projectnummer	060.20386

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

Samenvatting

In opdracht van de Provincie Overijssel heeft TNO Geologische Dienst van Nederland een hydrogeologische overzichtskaart van de regio Twente opgesteld. De kaart bestaat uit twee kaartbladen, welke aspecten van de ondergrond tonen die van belang zijn voor de grondwaterstroming in dit gebied. Het gaat daarbij om de ondiepe grondwaterstroming. De kaartbladen worden toegelicht in dit rapport. Dit document beschrijft tevens de wordingsgeschiedenis van de ondergrond, de stratigrafische indeling ervan, de wijze waarop de ondergrond wordt weergegeven in digitale ondergrondmodellen en relevante hydrogeologische aspecten van de Twentse ondergrond.

De regio Twente is voor Nederlandse begrippen tamelijk reliëfrijk. De hoogste terreindelen worden gevormd door stuwwallen. Daartussen liggen uitgestrekte vlaktes waarin de afwatering veelal matig is. De opbouw van de ondergrond van Twente is vrij complex en opgebouwd uit een groot aantal sterk uiteenlopende sedimentpakketten. Voor de overzichtelijkheid zijn de afzettingen in dit rapport daarom ingedeeld in vier hoofdgroepen, complexen genaamd. De complexen omvatten diverse lithostratigrafische formaties die onderlinge samenhang hebben. Het betreft het mariene, fluviatiele, glaciale en het periglaciale complex. Daarnaast komen op de afzettingen van deze complexen nog holocene afzettingen voor.

Het mariene complex is de oudste eenheid en omvat de Vlieland subgroep en de formaties van Landen, Dongen, Rupel, Veldhoven, Breda en Oosterhout. Deze geologische eenheden bestaan uit zeeafzettingen die veelal slecht doorlatend zijn. De top van het mariene complex vormt de regionale hydrologische basis en ligt in het noordwesten van het gebied op ruim 70 m diepte en langs de oostgrens nabij het maaiveld (circa 35 m +NAP).

Op dit complex ligt het fluviatiele complex, waarin rivierafzettingen zijn gegroepeerd (de formaties van Peize, Appelscha en Urk). Deze afzettingen zijn voor het grootste deel goed doorlatend en vormen samen de belangrijkste aquifer in de regio. Plaatselijk komen relatief dunne kleilagen voor. De dikte van dit complex neemt in Twente van oost naar west sterk toe.

Op en deels naast het fluviatiele complex bevindt zich het glaciale complex. Deze omvatten de afzettingen van de Formatie van Drente en de stuwwallen. De vorming van de afzettingen en het ontstaan van glaciale landvormen zijn het gevolg van ijsbedekking in het Saalien. Door het ijs zijn depressies in het landschap gevormd (glaciale bekkens en tunneldalen) en hoogtes opgestuwd (de stuwwallen). De afzettingen van het glaciale complex bestaan deels uit watervoerende pakketten en deels uit slecht doorlatende afzettingen. De laatste betreffen kleilagen (in de glaciale bekkens) en keileem. De stuwwallen in het oosten van Twente zijn voornamelijk opgebouwd uit dikke tertiaire kleipakketten van het mariene complex. De stuwwallen in het westen van de regio zijn opgebouwd uit afzettingen van het fluviatiele complex en bestaan uit goed doorlatend sediment afgewisseld door scheefstaande kleilagen. De scheefstaande kleilagen zijn een afspiegeling van de werking van het landijs en geven de stuwwallen een sterk anisotroop karakter.

Het periglaciale complex bevat alle afzettingen die tijdens de laatste ijstijd (Weichselien) zijn afgezet. Er heersten destijds toendracondities, met weinig vegetatie, waarbij de wind dekzand heeft afgezet. Tegelijkertijd zijn leemlagen afgezet in beekdalen en in meertjes. Leemlagen komen ook op uitgestrekte schaal voor samen met dekzand in de vlaktes tussen de stuwwallen. In het uiterste noordwesten van het gebied zijn rivierafzettingen neergelegd (Formatie van Kreftenheye).

Na de ijstijd (in het Holoceen) is de afzetting van leemlagen in de beekdalen door gegaan en hebben de slecht doorlatende leemlagen in de dekzandvlaktes, in samenhang met het geringe reliëf, geleid tot veenvorming. Tegenwoordig is het grootste deel van dat veen door afgraving weer verdwenen.

De sedimentpakketten van de genoemde complexen zijn gemodelleerd in het geologisch model DGM en het hydrogeologisch model REGIS II v2.2, welke ook de regio Twente beslaan.

Het bovenste watervoerend pakket bestaat in grote delen van Twente uit zand behorende tot het periglaciale complex. Dit pakket is freatisch behalve daar waar een deklaag aanwezig is. Deze deklaag komt alleen lokaal voor en bestaat uit het overgebleven veen of uit beekdalafzettingen. Kleivoorkomens binnen het bovenste pakket zijn vaak zandig, waardoor de weerstand beperkt is. Keileem is de voornaamste scheidende laag in het glaciële complex. De samenstelling en geometrie van deze eenheid is grillig.

De isohypsen van het bovenste watervoerend pakket vormen een afspiegeling van het lokale en regionale reliëf. De grondwaterstromingsrichting is in het algemeen naar het westnoordwesten en van de hogere stuwwaldelen naar de directe omgeving ervan. De hogere delen zijn infiltratiegebieden, waardoor de grondwaterstijghoogten hier hoger zijn. De weerstand van de gestuwde kleilagen in de oostelijke stuwwallen zorgt hier voor extra hoge stijghoogten. Beken en kanalen voeren grondwater af in de lagere delen, ook meest in noordwestelijk richting, waardoor de stijghoogten hier lager zijn. De diepere stijghoogten laten ruimtelijk een vergelijkbaar beeld zien.

Het diepere watervoerend pakket bestaat uit zandpakketten van het fluviatiele complex. Brak en zout water komt voor in de afzettingen van het mariene complex. Het brak-zout vlak is ongeveer gelijk aan de hydrologische basis en ligt in het oostelijk deel van de regio dichtbij het maaiveld.

De twee kaartbladen zijn getiteld A (met daarop de meest ondiepe hydrogeologische eenheden) en B (met daarop de wat dieper gelegen eenheden). Voor het bovenste watervoerend pakket zijn vooral de hydrogeologische eenheden op kaartblad A van belang. De verbreiding van de slecht-doorlatende eenheden op het kaartblad B laat zien waar stijghoogteverschillen verwacht mogen worden in de verticaal.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
2	Algemene beschrijving van de ondergrond van Twente.....	7
2.1	Landschap en geografie	7
2.2	Structurele geologie.....	7
2.3	Steenzout.....	9
3	Lithostratigrafische indeling van de ondergrond	10
4	Afzettingscomplexen en bijbehorende formaties	12
4.1	Mariene complex	14
4.2	Fluviatiele complex	17
4.3	Glaciale complex	18
4.4	Periglaciale complex.....	27
4.5	Holocene afzettingen.....	30
4.6	Samenvatting afzettingscomplexen.....	31
5	Ondergrondmodellen	33
5.1	DGM v2.2.....	33
5.2	REGIS II v2.2.....	33
6	Algemene beschrijving van de hydrogeologie	36
6.1	Watervoerende pakketten en scheidende lagen	36
6.2	De hydrologische basis	38
6.3	Het oppervlaktewatersysteem	38
6.4	Grondwaterstanden en grondwaterstroming	39
6.5	Zoet en zout grondwater	40
7	Ruimtelijk voorkomen hydrogeologische eenheden	42
7.1	Kaartblad A	42
7.2	Kaartblad B	43
8	Literatuur	46
9	Ondertekening	50

Bijlage(n)

A: HYDROGEOLOGISCHE KAART van Twente – kaartblad A

B: HYDROGEOLOGISCHE KAART van Twente – kaartblad B

1 Inleiding

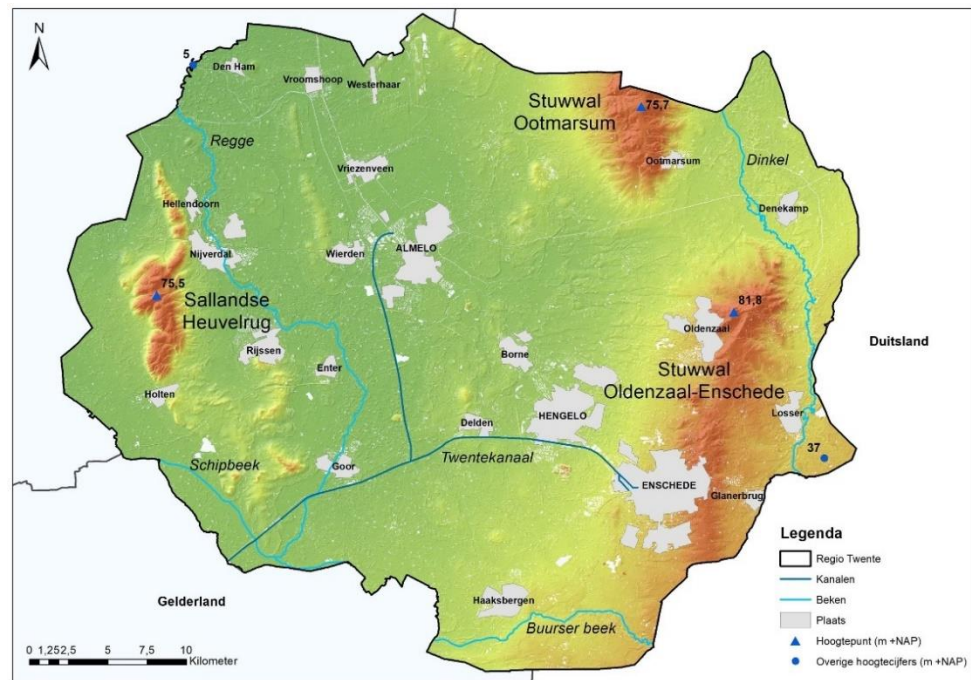
Dit document vormt een toelichting op een hydrogeologische overzichtskaart van de regio Twente. De kaart bestaat uit twee kaartbladen, welke aspecten tonen van de ondergrond die van belang zijn voor de grondwaterstroming in dit gebied. Het gaat daarbij om de ondiepe grondwaterstroming, welke wordt aangedreven door de neerslag die infiltreert in de grond en wordt gestuurd door verdamping, reliëf, oppervlaktewater en grondwateronttrekkingen. De grondwaterstroming is daarom van belang voor landbouw, grondwaterafhankelijke natuurgebieden en de drinkwatervoorziening.

De kaarten en dit rapport zijn vervaardigd door TNO Geologische Dienst van Nederland in opdracht van de Provincie Overijssel. De kaart omvat de bestuurlijke eenheid Twente welke bestaat uit 14 Overijsselse gemeenten. Dit gebied vormt een fysisch-geografisch samenhangende eenheid, waartoe ook het gebied rondom de Sallandse Heuvelrug wordt gerekend. Figuur 1 laat het gebied zien dat wordt besproken.

De twee kaartbladen van de hydrogeologische overzichtskaart betreffen:

- 1 Kaartblad A welke de hoogteligging van het maaiveld toont en de verbreiding van de ondiep voorkomende slecht doorlatende lagen.
- 2 Kaartblad B welke de verbreiding van dieper gelegen weerstandbiedende lagen toont, samen met breuklijnen en de diepteligging van de hydrologische basis.

Naast de beschrijving van de kaartbladen en de eenheden die daarop zijn afgebeeld schetst dit document de geologische geschiedenis van de regio Twente. De geologische eenheden (stratigrafie) en de samenstelling van de ondergrond (lithologie) komen aan bod, alsmede de vertaling naar hydrogeologische eenheden. Dit document vormt daarmee tevens een toelichting op het REGIS II v2.2 model van TNO voor de regio Twente.



Figuur 1. Overzichtskaat van de regio Twente met topografie en hoogteligging (AHN4).
De bruinrode gebieden zijn hoog gelegen, de groene gebieden relatief laag.

Bij de samenstelling van de kaartbladen en deze toelichting is gebruikt gemaakt van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN versie 4), gepubliceerde geologische kaarten (van den Berg & den Otter, 1993; van den Berg et al., 2000), de ondergrondmodellen DGM v2.2 en REGIS II v2.2 (Vernes & van Doorn, 2005; Hummelman et al., 2019a&b) alsmede de Bodemkaart van Nederland zoals op DINOloket en BROloket te raadplegen (de Vries et al., 2017; Bodemkaart, 2021). De modellen zijn ondergebracht in de Basisregistratie Ondergrond (BRO) en beschikbaar via <https://www.broloket.nl> en <https://www.dinoloket.nl>.

In de volgende hoofdstukken worden de diverse factoren die het landschap, de ondergrond en de hydrogeologische eigenschappen bepalen behandeld, eerst op hoofdlijnen en volgens grote structuren en daarna in meer detail. Hoofdstuk 2 bespreekt de landschappelijke elementen van Twente, de hoofdstructuren die bepalend zijn in de ondergrond en het steenzout dat in de wat diepere ondergrond voorkomt. Hoofdstuk 3 en 4 behandelen de indeling van de afzettingen in lithostratigrafische eenheden en de vormingsgeschiedenis. In hoofdstuk 5 wordt – in beknopte vorm – de schematisering van de ondergrond in het lithostratigrafische model DGM v2.2 en het hydrogeologische model REGIS II v2.2 besproken. Hoofdstuk 6 behandelt hydrogeologische aspecten welke spelen in Twente. Hoofdstuk 7, tenslotte, bespreekt de hydrogeologische kaartbladen.

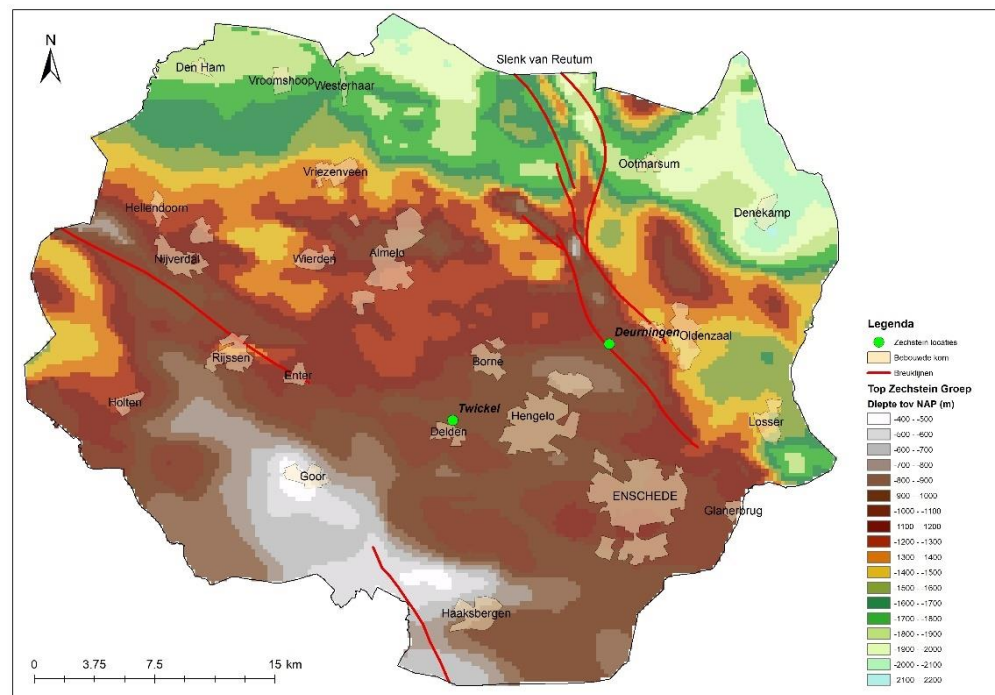
2 Algemene beschrijving van de ondergrond van Twente

2.1 Landschap en geografie

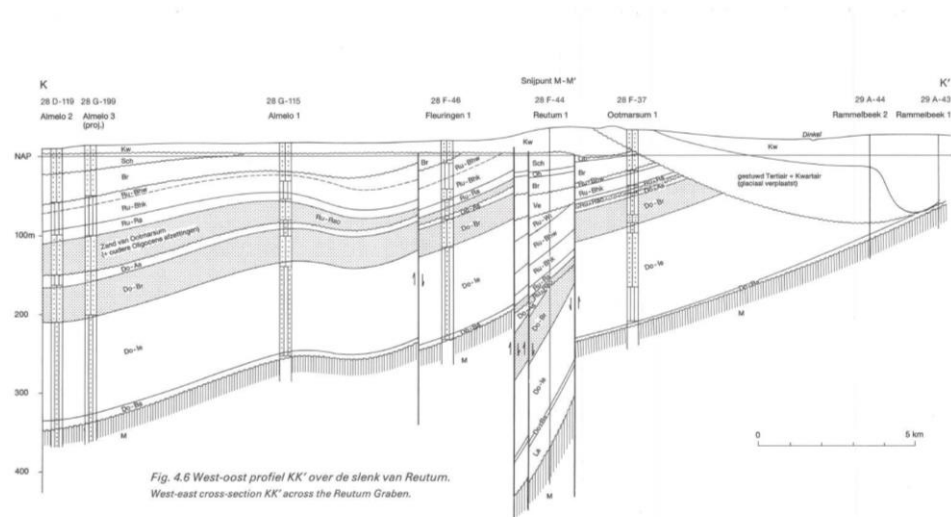
Het landschap van Twente wordt bepaald door uitgestrekte, relatief hoog gelegen, zandgronden met gering reliëf, afgewisseld met heuvelachtige gebieden (zie Figuur 1). De Tankenberg in het oosten vormt het hoogste punt in de regio (81,8 m +NAP). In het westen van het gebied ligt de Sallandse Heuvelrug (75,5 m +NAP) en in het noorden de stuwwal van Ootmarsum (maximaal 75,7 m +NAP). De hoogteligging van de uitgestrekte zandgronden tussen de stuwwallen neemt in westelijke en noordwestelijke richting af. Het hoogst gelegen punt - buiten de stuwwallen - ligt in de omgeving van Overdinkel (circa 37 m +NAP) en het laagst gelegen punt langs de Regge in het noordwesten van het gebied (circa 5 m +NAP). Natuurlijke oppervlaktewateren zoals de Regge en de Dinkel wateren dan ook in noordwestelijke richting af. De grondwaterstanden variëren sterk en worden bepaald door de hoogteligging van het terrein en de directe omgeving, de samenstelling van de ondergrond en de grondwaterstroming. Deze variabelen zijn direct bepalend voor de actuele en potentiële natuurwaarden in het gebied en de geschiktheid voor bijvoorbeeld landbouwactiviteiten en andere gebruiksfuncties.

2.2 Structurele geologie

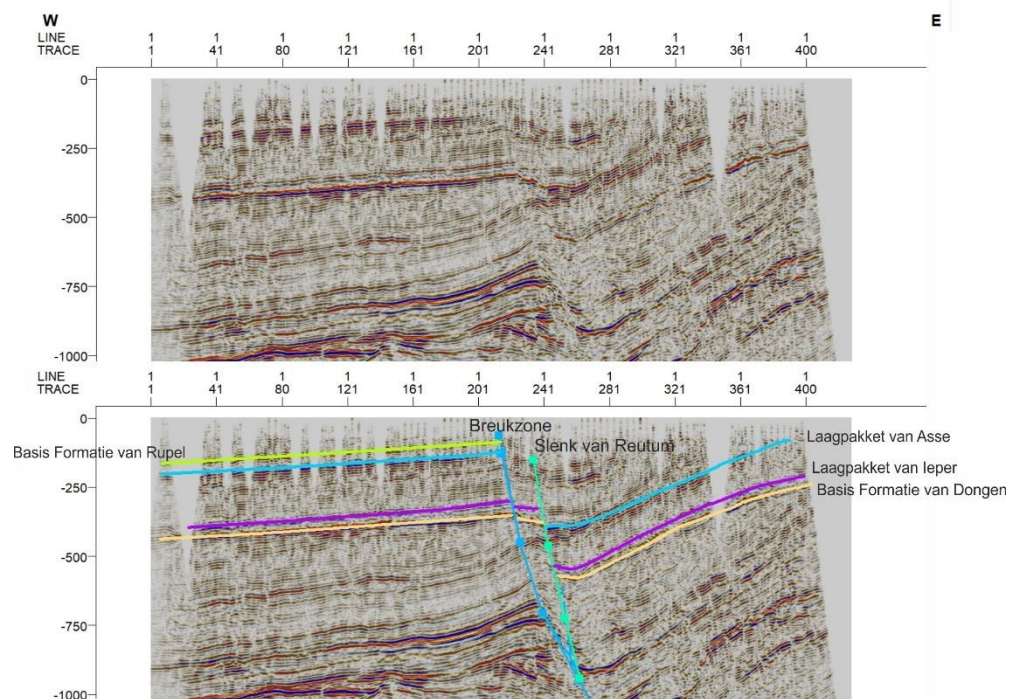
De basis van het landschap wordt bepaald door de structureel geologische opbouw van de diepere ondergrond. Onder structurele geologie wordt verstaan de ligging en vorm van gesteentelichamen en de grootschalige processen waaronder gesteentepakketten vervormen. Dat laatste kan leiden tot bijvoorbeeld daling of opheffing van hele gebieden en de vorming van breuken. Twente en de oostelijke Achterhoek behoren tot de randzone van het langdurig dalende Noordzeebekken. Het gevolg is dat tektonische bodemdaling in Twente van oost (verder gelegen van het Noordzeebekken) naar west (dichter bij de Noordzee) toeneemt. Dit proces vindt al miljoenen jaren plaats en als gevolg daarvan hellen de sedimentpakketten in de Twentse ondergrond - en het landschap zelf - naar het noordwesten. Westelijk van de lijn Goor-Vroomshoop ligt een sterker dalend deel van het bekken en oostelijk daarvan een wat meer stabiele zone. Deze zone wordt doorsneden door enkele breuklijnen die tot dicht nabij het maaiveld komen (zie Figuur 2 en kaartblad B). De belangrijkste breuklijn loopt vanaf Gronau – ten zuidoosten van Enschede - in noordwestelijke richting en dooft uit voor Tubbergen. Tussen Tubbergen en Weerselo verspringt de breuk naar het oosten en gaat over in de westelijke breuk van de Slenk van Reutum (zie Figuur 2). In deze slenk, liggen de ondiepere sedimentpakketten lager dan in de directe omgeving (schematisch weergegeven in Figuur 3). Zoals is te zien in Figuur 4 is de westgrens van de slenk daadwerkelijk een breuk (dus scherp) en de oostgrens een flexuur (dus geleidelijk verlopend). In noordelijke richting worden de sedimentpakketten in de slenk steeds dikker. De aquifers in de slenk zijn daardoor geschikt voor drinkwaterwinning (zie Provincie Overijssel, 2017b en paragraaf 6.2).



Figuur 2. Diepteligging van de top van de Zechstein Groep (bron: model DGMdiep v5.0 beschikbaar via www.dinoloket.nl). De Zechstein Groep omvat de zoutafzettingen in de diepere ondergrond. Op de figuur zijn tevens zijn de voornaamste breuken weergegeven en de Slenk van Reutum gelegen tussen twee breuksystemen in het noorden van de regio.



Figuur 3. Schematisch west-oost profiel over de Slenk van Reutum en de indeling van tertiaire sedimentpakketten volgens Van den Berg en den Otter, 1993.



Figuur 4. Seismisch profiel over de Slenk van Reutum zonder (boven) en met interpretatie (onder). Verticale as in meters beneden NAP. Het profiel is 10,7 km lang. De bandering betreft reflecties welke veroorzaakt worden door snelheidsverschillen tussen opeenvolgende sedimentpakketten. De onderbreking van de horizontale bandering in het midden geeft de breukzone aan. De laagpakketten van Asse en Ieper zijn onderdeel van de Formatie van Dongen.

2.3 Steenzout

Steenzout is in Twente een van oudsher bekende delfstof. Eind 19^e eeuw werd op Landgoed Twickel voor de eerste keer steenzout aangeboord en daarna gewonnen. Omdat steenzout, lithostratigrafisch gerekend tot de Zechstein Groep, zich plastisch gedraagt in de ondergrond zijn de oorspronkelijk horizontaal afgezette zoutlagen vervormd. Door de grote druk van de bovenliggende gesteentelagen, is de laag steenzout via zwakke plekken in dat bovenliggende pakket - zoals langs breuken - omhoog gevloeid. Dit proces wordt halokinese genoemd. Daarbij worden zoutdiapieren gevormd, ondergrondse structuren die een paar kilometer groot kunnen zijn. Het gevolg is dat steenzout niet op één bepaalde diepte is te vinden, maar dat de diepteligging van de bovenkant over korte afstand sterk varieert (zie Figuur 2). In het gebied Goor-Haaksbergen ligt het zout over het algemeen het meest ondiep, maar bij Deurningen komt langs de Gronau Breukzone zeer lokaal een nog ondiepere opduiking voor (tot ca. 250 m -NAP, in verband met de resolutie en schaal niet zichtbaar in Figuur 2). Er zijn echter geen aanwijzingen dat zoutintrusies de ondiepe grondwaterkwaliteit beïnvloeden (zie hoofdstuk 6).

3 Lithostratigrafische indeling van de ondergrond

Afzettingen in de ondergrond kunnen op verschillende manieren worden gegroepeerd en ingedeeld. In Nederland worden daarbij diverse criteria gebruikt. Leidende elementen in de indeling van de ondergrond zijn het afzettingsmilieu en het transportmechanisme van het sediment (zee, rivieren, landijs, wind of beken), de ouderdom en de herkomst ervan (bijvoorbeeld Noord- of Midden-Europa). Daarnaast is de samenstelling van de afzetting (lithologie) van belang, samen met de onderlinge verticale positie (wat ligt op wat). Als op deze manier een indeling van de ondergrond gemaakt wordt spreekt men van lithostratigrafie. De lithostratigrafische onderverdeling van de ondergrond vergemakkelijkt de communicatie over en de modellering van de eenheden welke in bijvoorbeeld boringen en groeves kunnen worden waargenomen. De lithostratigrafische indeling bevat verschillende hiërarchische niveaus, met bovenaan groep, subgroep en formaties, welke verder kunnen worden opgedeeld in laagpakketten en – op het laagste hiërarchische niveau – in lagen.

In 1975 zijn door de Rijks Geologische Dienst lithostratigrafische definities opgesteld die gedurende lange tijd algemeen in gebruik waren (Doppert et al., 1975). In 2000 is deze lithostratigrafische indeling herzien (Weerts et al., 2000; de Mulder et al., 2003). Bij deze herziening is een aantal stratigrafische grenzen verlegd en zijn enkele nieuwe namen geïntroduceerd. Naamsveranderingen zijn toegepast indien de definitie van de desbetreffende eenheid significant is aangepast. De lithostratigrafische indeling van de Nederlandse ondergrond is dynamisch, dat wil zeggen dat aanpassingen in de indeling mogelijk blijven indien nieuwe onderzoeksresultaten en voortschrijdend inzicht daar om vragen. De actuele indeling met beschrijvingen van de onderscheiden eenheden is te raadplegen op <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator>. Tabel 1 geeft een overzicht van de lithostratigrafische eenheden die in de regio Twente voorkomen.

Tabel 1. Overzicht van lithostratigrafisch eenheden welke in de regio Twente voorkomen volgens de indeling uit 2003 en oude namen uit de indeling van Doppert *et al.* (1975) indien deze afwijken. De meest actuele beschrijvingen zijn te vinden op <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator>.

Formatie	Laagpakket of Laag ²⁾	Afzettingsmilieu	Dominante lithologie	Naamgeving Doppert et al., 1975
Nieuwkoop	Griendtsveen	Moeras	Veen	
Boxtel	Kootwijk	Wind	Stuifzand	Twente
	Wierden	Wind	Dekzand	
	Singraven	Beken	Leem, zand en veen	
	Tilligte	Meren, kommen	Leem	
	Ongedifferentieerd	Helling- en overige lokale afzettingen	Divers, veelal zand, ook leem en veenlaagjes	Twente, Asten
Kreftenheye	Ongedifferentieerd	Fluviatiel (Rijn)	Grindig zand	
	Zutphen	Fluviatiel (Rijn)	Veen, klei, leem, fijn zand	
	Twello	Fluvio-deltaïsch	Leem, klei	

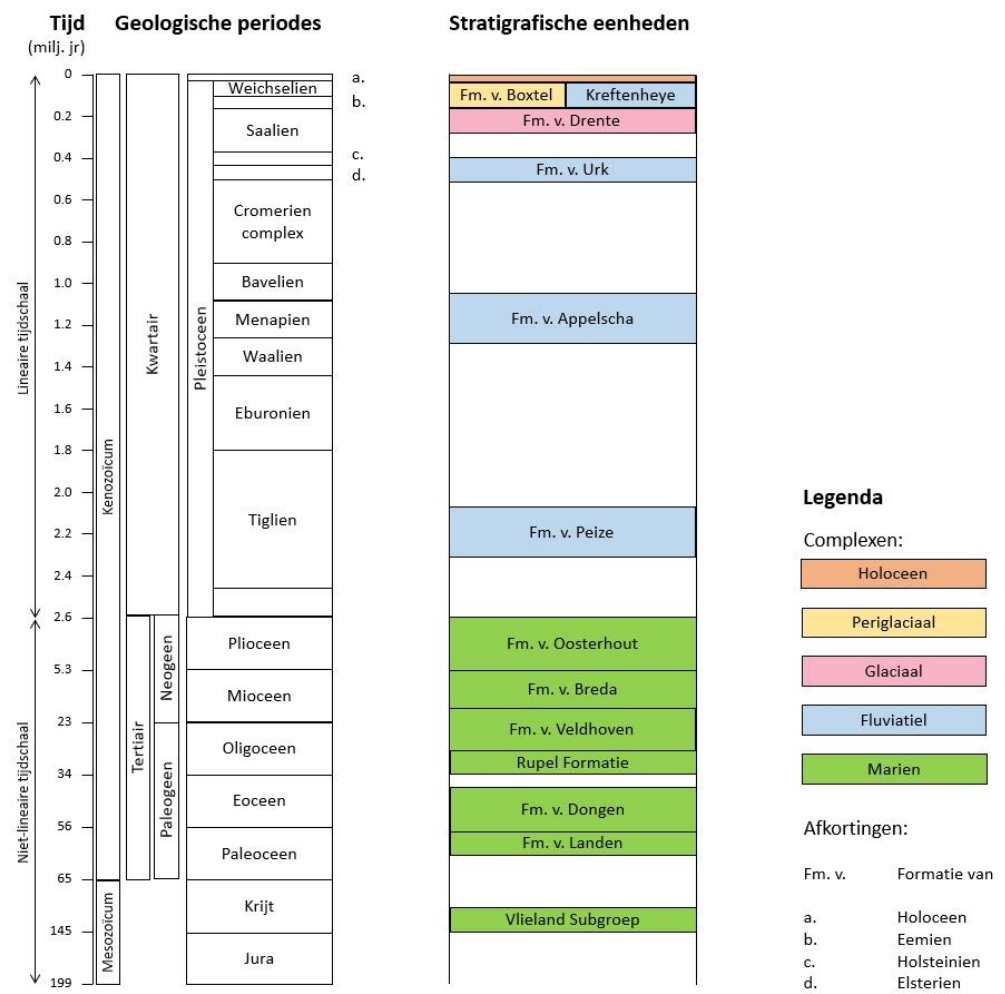
Formatie	Laagpakket of Laag ²⁾	Afzettingsmilieu	Dominante lithologie	Naamgeving Doppert et al., 1975
Drente	Gieten	Glaciaal	Keileem	
	Schaarsbergen	Glaciaal	Smeltwaterafzettingen	
	Uitdam	Glaciaal	Kleiige en fijnzandige meerbodemaafzettingen	
Urk	Ongedifferentieerd	Fluviatiel (Rijn)	Grof, grindhoudend zand, lokaal klei	
Appelscha	Ongedifferentieerd	Fluviatiel (oostelijk)	Grof, grindhoudend zand	Enschede
Peize	Ongedifferentieerd	Fluviatiel (oostelijk)	Grof, grindhoudend zand	Harderwijk
	Balk	Kustnabij	Klei, leem en fijn zand	Tegelen
Oosterhout	Ongedifferentieerd	Marien	Fijn tot grof zand, lokaal kleiig, schelpenbanken	Scheemda (deels)
	Lievelde			
Breda	Delden	Marien	Glaucioniethoudende leem en klei; fijn glaucioniethoudend zand	
	Zenderen			
	Eibergen			
	Aalten			
Veldhoven		Marien	Glaucioniethoudend zand en zandige klei	
Rupel	Winterswijk ²⁾	Marien	Klei, stevig tot hard; glaucioniethoudend zand	
	Brinkheurne ²⁾			
	Ratum			
Dongen	Asse	Marien	Klei; fijn zand en zandsteen; harde klei	
	Brussel			
	Ieper			
Landen		Marien	Zandige klei en glaucioniethoudend zand	
Vlieland Kleisteel en Vlieland Zandsteen	Gildehaus Zandsteen en Bentheim Zandsteen	Marien	Grofkorrelige en fijnkorrelige zandsteen	

Laagpakketten en ²⁾lagen die voor de hydrogeologie van Twente relevant zijn. De formaties van Veldhoven en Landen zijn alleen (plaatselijk) te vinden in de Slenk van Reutum en worden in de regio Twente niet onderverdeeld in laagpakketten of lagen.

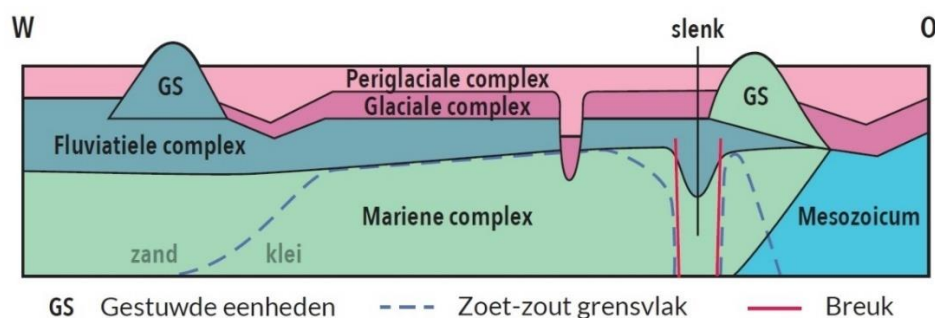
4 Afzettingscomplexen en bijbehorende formaties

Dit hoofdstuk behandelt de geologische ontstaansgeschiedenis van de Twentse ondergrond. Om de complexe opbouw van de ondergrond van Twente te kunnen overzien, zijn de in dit gebied aanwezige lithostratigrafische eenheden samengevoegd in vier hoofdgroepen, complexen genaamd. De complexen vormen groepen van samenhangende lithostratigrafische eenheden. De indeling in complexen is gebaseerd op de genese (het afzettingsmechanisme) en de agens (transportmiddel) waarmee het sediment is afgezet. Sedimentpakketten kunnen worden afgezet door en in de zee (gegroepeerd in het mariene complex), door rivieren (het fluviatiele complex), door landijs (ijskappen; het glaciale complex), door lokale processen welke opgetreden zijn onder toendracondities (het periglaciale complex) en tijdens het Holoceen. Daarnaast kunnen delen van de eerste drie complexen tot stuwwal zijn opgeworpen. De stuwwallen worden tot het glaciale complex gerekend.

In Figuur 5 is op schematische wijze te zien wanneer de lithostratigrafische eenheden zijn afgezet en in welk milieu. Figuur 6 laat de relatieve ligging zien van de complexen in een geschematiseerde west-oost dwarsdoorsnede door de ondergrond van Twente. In de volgende paragrafen worden de complexen besproken.



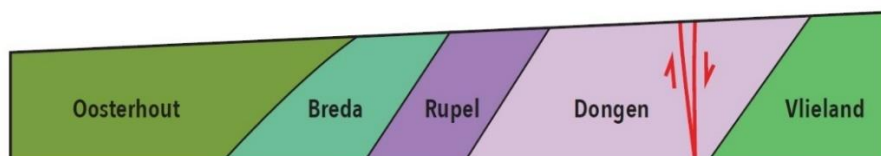
Figuur 5. Overzicht van geologische tijdvakken, voor de regio Twente relevante lithostratigrafische eenheden en de complexen (milieu) waarin ze zijn afgezet.



Figuur 6. Schematisch dwarsprofiel van de geologische opbouw van Twente in genetisch verschillende complexen - die in hoofdstuk 4 worden toegelicht - en breuken. Het zoet-zout grensvlak is schematisch weergegeven.

4.1 Mariene complex

Het mariene complex bestaat uit naar het westen hellende formaties van paleogene en neogene ouderdom ('Tertiair'). Ook mesozoïsche pakketten welke in de Twentse ondergrond voorkomen zijn van mariene oorsprong.



Figuur 7. Schematisch west-oost profiel van het mariene complex in Twente, waarin de relatieve posities van de formaties en de Vlieland subgroep zijn weergegeven. De rode lijnen geven schematisch breuken aan en de bewegingsrichting van de sedimentpakketten.

Alle lithostratigrafische formaties binnen het mariene complex bestaan uit sedimenten die in zee of nabij een voormalige kustlijn zijn afgezet. De waterdiepte van de toenmalige zee varieerde sterk in de tijd. Sommige sedimentpakketten zijn afgezet in een ondiep, kustnabij milieu en andere in een tot ~200 m diepe zee. Dit verschil is van belang omdat in een diepere zee alleen (massieve) klei wordt afgezet en nabij de kust klei en zand afwisselend voorkomen. Dicht bij de kust sorteert golfwerking de sedimenten en komen meerdere kustmilieus naast elkaar voor (bijvoorbeeld stranden, getijdengeulen en lagunes). De afzettingen van het mariene complex bestaan daarom enerzijds uit massieve klei en anderzijds uit fijnzandige klei en zanden.

In Twente bestaat het mariene complex uit de lithostratigrafische eenheden Vlieland subgroep en de formaties van Landen, Dongen, Rupel, Veldhoven, Breda en Oosterhout. Deze eenheden worden hieronder nader besproken.

Vlieland subgroep

De Vlieland subgroep is van mesozoïsche ouderdom en bestaat in het onderste deel uit twee zandsteenpakketten (Vlieland Zandsteen Formatie) en hierboven een kleiig deel (Vlieland Kleisteen Formatie). De zandstenen worden tezamen ook wel

de Onder-Krijt zanden genoemd en zijn van belang voor (drink)waterwinning. In het westen van de regio is sprake van een massief zandsteenpakket. Naar het oosten toe worden de zandsteenpakketten fijner en komen ingeschakelde kleisteenlagen voor. De oudste zandsteen, Bentheim Zandsteen Laagpakket, is zeer goed gesorteerd en bevat weinig kalkcement. In dit laagpakket komen dunne kleilagen voor. De bovenste zandsteen wordt Gildehaus Zandsteen Laagpakket genoemd, is fijnkorrelig en rijk aan fossielen. Deze zandsteen is ontsloten in de Staringgroeve te Losser. De dikte van dit pakket kan oplopen tot meer dan 100 meter. Op de zandsteenpakketten liggen kleistenen van de Vlieland Kleisteen Formatie. De drinkwaterwinning Enschede-Losser onttrekt grondwater uit de diep gelegen Bentheimer Zandsteen (Provincie Overijssel, 2017a).

Formaties van Landen en Dongen

De Formatie van Landen is te vinden in de Slenk van Reutum en bestaat uit zandige klei en glauconiethoudend zand. De Formatie van Dongen komt in vrijwel de hele regio voor en bestaat uit paleogene kleipakketten (het Laagpakket van leper en Asse) en het daartussen gelegen zand(steen) van het Laagpakket van Brussel. In boorgatmetingen is het zandige Laagpakket van Brussel goed te onderscheiden van de onder en bovenliggende kleipakketten. Het Laagpakket van leper bestaat uit een monotoon pakket zandige klei en kleiige fijne zanden. Het Laagpakket van Brussel bestaat uit matige grove zanden en zandstenen waarin schelpgruis voorkomt. Het Laagpakket van Asse is opgebouwd uit licht tot zware kleien en lemen, die een wisselend gehalte fijn zand bevatten. Een deel van de Formatie van Dongen is opgenomen in de stuwwallen van Ootmarsum en Oldenzaal.

Formaties van Rupel en Veldhoven

De Rupel Formatie is te vinden in het centrale en westelijke deel van de regio en in gestuwde positie in de stuwwal van Ootmarsum. Voor de regio Twente zijn het Laagpakket van Ratum en de lagen van Brinkheurne en Winterswijk van belang. Beide lagen zijn onderdeel van het Laagpakket van Boom. Het Laagpakket van Ratum bestaat in Twente uit glauconiethoudend zand (de Laag van Ootmarsum) of kleilig zand. De Laag van Brinkheurne bestaat uit stugge kleipakketten met kalkconcreties, septariën genoemd. De Laag van Winterswijk komt alleen in de Slenk van Reutum voor en bestaat uit een afwisseling van lemige klei en laagjes fijn zand.

De Formatie van Veldhoven is in de regio Twente alleen in het zuidelijk deel van de Slenk van Reutum te vinden en bestaat daar uit glauconiethoudend zand en zandige klei.

Formatie van Breda

Tijdens het Mioceen zorgde opheffing van het achterland (ten zuidoosten van het huidige Twente) voor toename van sedimentaanvoer naar de zee door rivieren. Tijdens fasen van relatief geringe opheffingsnelheid overheerste de aanvoer van klei; tijdens fasen met een grotere opheffingsnelheid nam de aanvoer van zand toe. In deze tijd zijn de mariene afzettingen van de Formatie van Breda gevormd.

Met name de zandige afzettingen binnen de Formatie van Breda zijn rijk aan het mineraal glauconiet, in de vorm van donkergroene korrels in de zandfractie, dat zich vormt onder specifieke omstandigheden in warme, ondiepe zeeën. Het mineraal geeft een hoge gammastraling en is daarom zeer opvallend in boorgatmetingen. De Formatie van Breda is te vinden in het midden en westen van de regio Twente en – in gestuwde vorm - in de stuwwal van Ootmarsum. De eenheid is onderverdeeld in laagpakketten die de genoemde afwisseling van zand en klei representeren.

De oudste en diepst gelegen eenheid betreft het Laagpakket van Aalten en omvat sterk siltige klei en glauconiethoudend zand. Het daarboven afgezette Laagpakket van Eibergen wordt gekenmerkt door matige zware, stugge klei die zeer rijk is aan glimmer. Het Laagpakket van Zenderen bestaat uit fijn, glauconiethoudend zand. Bovenin de Formatie van Breda is het Laagpakket van Delden te vinden. Deze bestaat uit glauconiethoudende, zandige leem en klei. In de zandfractie komt daarnaast soms veel goethiet (ijzerertskorrels) voor, welke het sediment bruin van kleur kan maken.

Op basis van onderzoek in Zuid-Nederland is een voorstel gedaan om de lithostratigrafische indeling van de Formatie van Breda in de toekomst te herzien (Munsterman et al., 2019). Het onderzoek is gebaseerd op een combinatie van litho- en biostratigrafische kenmerken en seismische beelden van de opeenvolging van de afzettingen. Aangezien de eenheid in de regio Twente beneden de hydrologische basis ligt, is een dergelijke herindeling voor grondwaterstudies in dit gebied echter van beperkt belang.

Formatie van Oosterhout

Tijdens het Pliocene nam de aanvoer van (rivier)zand naar zee verder toe en de diepte van de zee steeds verder af. Daarom werd golfomwerking van de zeebodem van belang. De afzettingen die toen zijn afgezet worden gerekend tot de Formatie van Oosterhout en kunnen naast kleipakketten ook grove, kwartsrijke zanden bevatten en dikke schelpenlagen. De grove zanden vertonen enige gelijkenis met de fluviatiele zanden die de bron vormden van het zeezand. Eerder werden deze mariene zanden daarom ingedeeld bij de voormalige Formatie van Scheemda (de Afzettingen van Weerselo). Sinds 2003 worden de grove delen zonder duidelijke mariene kenmerken gerekend tot de Formatie van Peize en de fijnere delen met mariene signatuur tot de Formatie van Oosterhout (TNO-GDN, 2021). Het glauconietgehalte in de Formatie van Oosterhout varieert met de diepte en daarmee ook de groenkleuring van het zand; hoe ondieper hoe minder groenkleuring (grijzer in plaats van groenig zand). Zeer fijne tot matige fijne zanden met een zeer goede sortering worden gerekend tot het Laagpakket van Lieveelde. De zanden zijn kalkloos en bevatten glimmers. In het Laagpakket van Lieveelde is de korrelgrootte van het glauconiet over het algemeen fijner dan in de laagpakketten van de Formatie van Breda. Ook goethiet komt in deze eenheid voor.

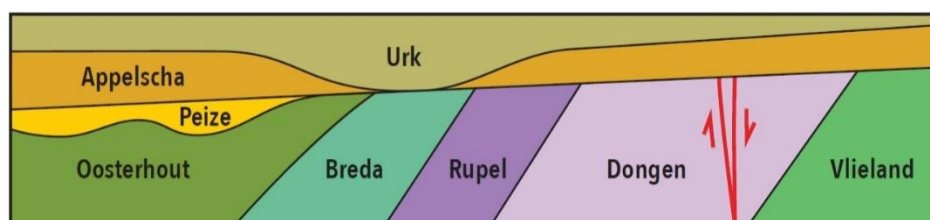
Na de vorming van het mariene complex is het grootste deel van de regio een landoppervlak geweest waar langdurig erosie plaatsvond. De mariene eenheden zijn daarbij door tektonische processen scheef komen te staan. Tijdens het Saalien werd Twente bedekt door landijs dat zich vanuit de Scandinavische regio had uitgebreid tot over Noord- en Midden-Nederland. Een deel van het mariene complex is toen opgenomen in de stuwwallen (paragraaf 4.3).

Hydrogeologie van het mariene complex

Het gehele mariene complex wordt sterk gedomineerd door kleiige afzettingen. De bovenkant van de kleiige afzettingen wordt in de regio Twente beschouwd als de hydrologische basis van het gehele grondwatersysteem (zie kaartblad B). Grove zanden die aan de top van de Formatie van Oosterhout voorkomen maken echter deel uit van het diepe watervoerende pakket. Een andere uitzondering is het watervoerend pakket in de Vlieland Zandsteen Formatie, waaruit de drinkwaterwinning Enschede-Losser onttrekt. De beschikbare hoeveelheid zoet grondwater boven het mariene complex wordt mede bepaald door de diepteligging van de hydrologische basis. Met name in het zuidoosten van de regio ligt deze basis tamelijk ondiep of zelfs nabij het maaiveld (zoals bij Delden). De hierboven beschreven tektonische dalingsprocessen hebben ervoor gezorgd dat de top naar het (noord)westen diep is weggezakt. De hydrologische basis ligt in de omgeving van de Lemelerberg daarom op circa 100 m -NAP.

4.2 Fluviatiele complex

Tijdens het Vroeg-Pleistoceen is het gebied bedekt geraakt door grindhoudende, grove rivierzanden. Deze afzettingen, gegroepeerd tot het fluviatiele complex, vormen in de regio Twente het belangrijkste watervoerende pakket. Het complex bestaat uit de formaties van Peize, Appelscha en Urk. Deze pakketten liggen discordant op de scheefgestelde lagen uit het (veel oudere) mariene complex zoals schematisch is weergegeven in Figuur 8.



Figuur 8. Schematisch west-oost profiel van het fluviatiele complex (formaties van Peize, Appelscha en Urk) gelegen op het mariene complex.

Formaties van Peize en Appelscha (Oostelijke rivieren)

De oudste rivierafzettingen zijn neergelegd door de voormalige Eridanos rivier, die sediment uit Noordoost-Europa (het Baltische gebied) aanvoerde. Deze afzettingen worden tot de Formatie van Peize gerekend en bestaan vooral uit grindhoudende, grijze en grijswitte zanden die in het noordwestelijk deel van de regio en in de Slenk van Reutum te vinden zijn. Onderin de formatie kunnen ook klei en fijnzandige lagen voorkomen (Laagpakket van Balk, in REGIS II v2.2 het Peize complex; PZc).

De Formatie van Appelscha komt ook vooral in het noordwesten voor, in de Slenk van Reutum en als onderdeel van de stuwwallen. Deze eenheid bevat eveneens grindhoudende rivierzanden, vaak wit van kleur, die uit Centraal- en Oost-Europa afkomstig zijn. Aan de top van deze formatie kunnen zeer grove, sterk grindhoudende pakketten voorkomen, welke als het Laagpakket van Weerdinge worden onderscheiden. Het Laagpakket van Weerdinge bevat Scandinavisch

graniet wat aangeeft dat er tijdens de afzetting ervan waarschijnlijk landijs moet hebben gelegen ten noordoosten van Twente.

Deze ijsbedekking is zelfs ouder dan de Elsterien ijstijd waarvan de sporen in Noord-Holland, Friesland, Drenthe, Groningen te vinden zijn.

Voorheen werden de formaties van Peize en Appelscha gerekend tot de Formatie van Harderwijk en de Formatie van Enschede en deels tot de Formatie van Urk en Tegelen (Doppert et al., 1975; Tabel 1).

Formatie van Urk (Rijnafzettingen)

Tijdens het Midden-Pleistoceen heeft de Rijn grindrijke, bontgekleurde rivierzanden neergelegd welke bekend zijn als de Formatie van Urk. Deze afzettingen zijn te vinden in het gebied tussen Almelo en de Sallandse Heuvelrug en deels in gestuwde positie in deze stuwwal. Aan de top van dit pakket komen rivierkleien voor. In het REGIS II v2.2 model zijn deze kleien gemodelleerd als eenheid URk1. De verbreiding van deze kleien, die als weerstand biedende laag van belang zijn, is aangegeven op kaartblad B.

Tijdens het Saalien werd Twente bedekt door landijs dat zich vanuit de Scandinavische regio had uitgebreid tot over Noord- en Midden-Nederland. Een deel van het fluviatiele complex is toen opgenomen in de stuwwallen (zie paragraaf 4.3).

Hydrogeologie van het fluviatiele complex

De afzettingen van het fluviatiele complex bestaan voor het grootste deel uit grindhoudende, grove zanden en vormen het belangrijkste watervoerend pakket in Twente. De dikte van het fluviatiele complex varieert van enkele meters in het zuidoosten tot circa 100 meter in het noordwesten van de regio. In de Slenk van Reutum kon door de tektonische daling zich een circa 60 m dik pakket fluviatiele zanden vormen. Dit pakket vormt daar een belangrijke aquifer waaruit water wordt gewonnen (Provincie Overijssel, 2017b).

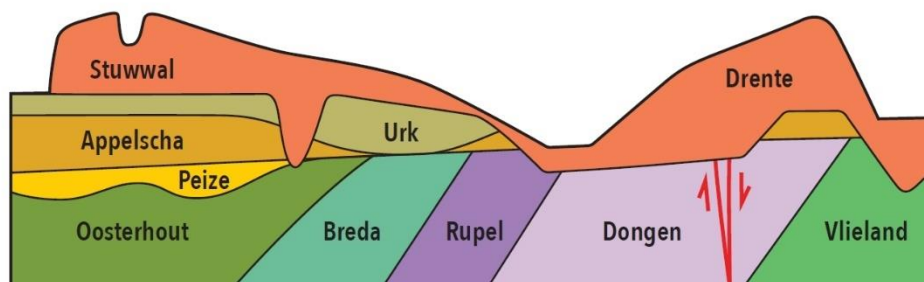
De verticale overgang in de doorlatendheid van het mariene complex naar het fluviatiele complex is veelal scherp (abrupt) en vormt de hydrologische basis. In het westen van de regio is het verschil wat geleidelijker, omdat de onderliggende afzettingen van de Formatie van Oosterhout daar zandiger van samenstelling zijn.

4.3 Glaciale complex

Gedurende het Pleistoceen zijn veelvuldig koude perioden voorgekomen die wereldwijd tot grote uitbreidingen van gletsjers en landijskappen hebben geleid. Tussen deze ijstijden kwamen warme perioden voor (interglacialen). In Noord-Nederland zijn afzettingen te vinden uit het Elsterien, deze ontbreken in Twente. Tijdens de voorlaatste ijstijd (het Saalien) breidde een ijskap die geheel Scandinavië bedekte, zich verder over Nederland uit. Het ijs heeft – tijdens deze uitbreiding - tijdelijk halt gehouden in de omgeving van Nordhorn-Losser en in de omgeving van Rijssen. Tijdens de daaropvolgende maximale uitbreiding was de gehele Twentse regio door ijs bedekt (de ijsrand lag toen ongeveer op de lijn Nijmegen - Utrecht - Haarlem).

Tijdens de ijsbedekking zijn diverse afzettingen neergelegd en is het - tot dan - vrij vlakke Twentse landschap drastisch veranderd. Aan de randen van het ijs werden

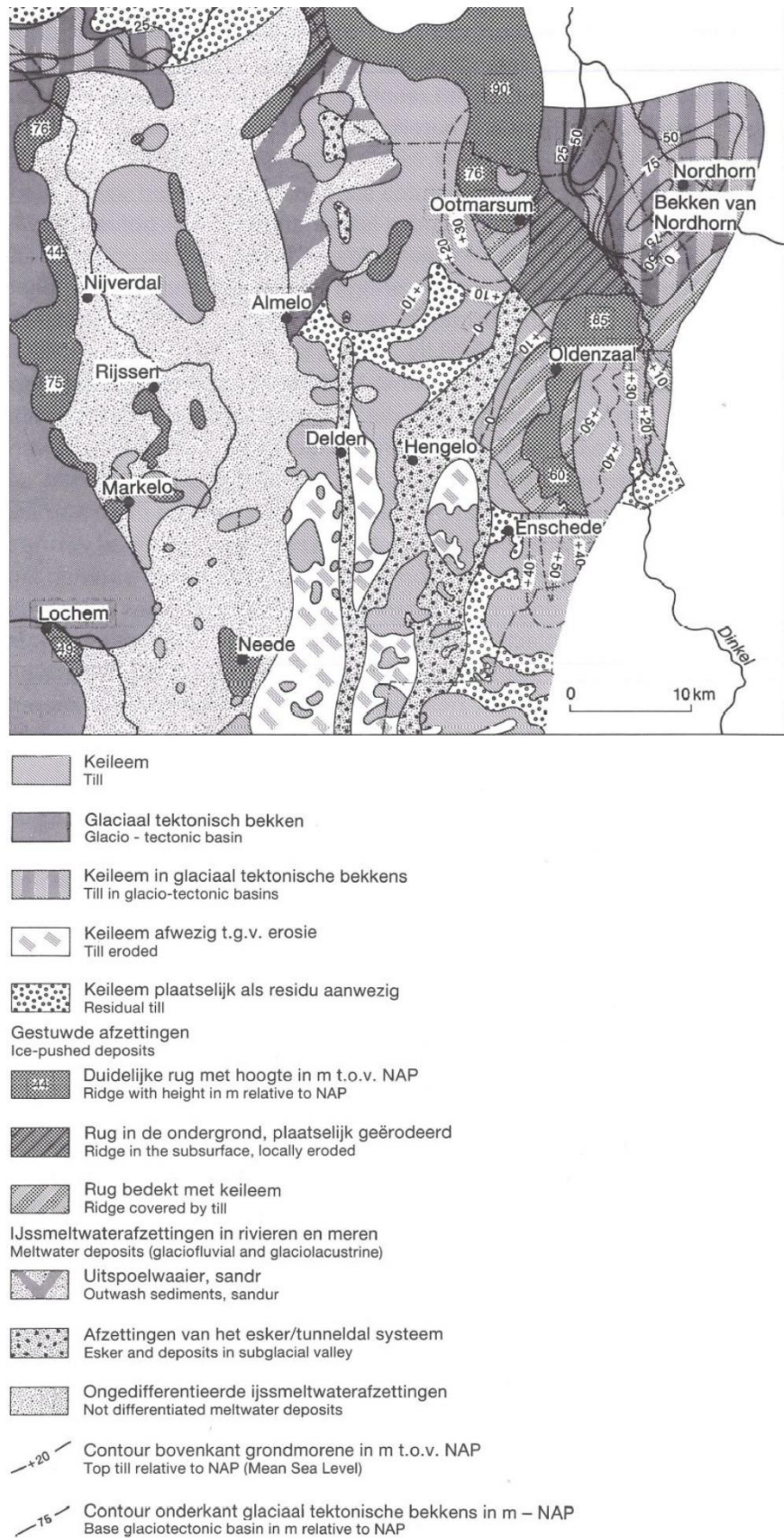
heuvelruggen opgeduwd (de stuwwallen) en aan de onderzijde van het ijs kon plaatselijk sterke erosie plaatsvinden (glaciale bekkens).



Figuur 9. Schematisch west-oost profiel van het glaciale complex (Formatie van Drente en de stuwwallen) gelegen op het fluviale en het mariene complex.

De afzettingen die aan het Saalien landijs zijn gerelateerd worden gerekend tot het glaciale complex. Figuur 9 geeft schematisch de positie weer. Het complex omvat zeer heterogene afzettingen die deels watervoerend zijn en deels uit slecht doorlatende lagen bestaan. Hiertoe behoren afzettingen die direct door landijs zijn afgezet, namelijk grondmorene (met name keileem, welke vooral onder het landijs werd neergelegd) en smeltwaterafzettingen (welke vooral aan de randen van het landijs zijn afgezet). Daarnaast heeft de dynamiek in de landijsbedekking gezorgd voor deformatie (vervorming) van oudere afzettingen en stuwwalvorming.

Figuur 10 geeft een indruk van de diversiteit van het glaciale complex. De volgende subparagrafen beschrijven de vorming van de stuwwallen en hun interne opbouw, de smeltwaterafzettingen en de keileemafzetting.



Figuur 10. Ligging van de stuwwalcomplexen, glaciële bekken, tunneldalen en eskers in Twente (bron: van den Berg & den Otter, 1993).

4.3.1 *Stuwwalvorming*

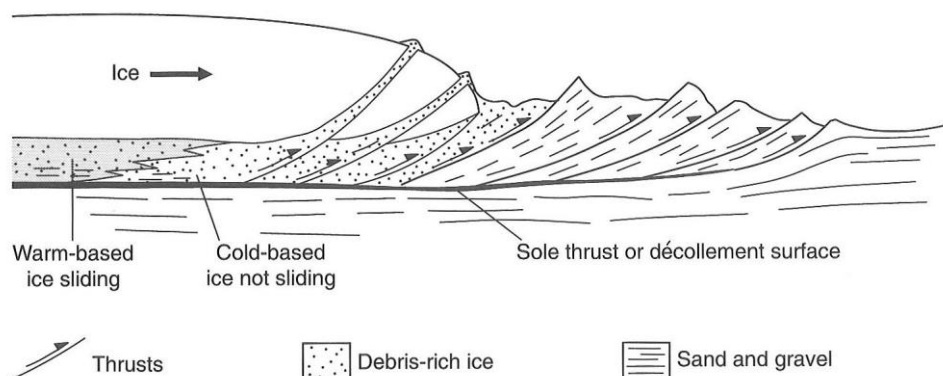
Het effect van landijsbedekking op de ondergrond is enerzijds afhankelijk van de dynamiek van de ijskap en wordt anderzijds bepaald door de samenstelling en opbouw van de ondergrond en het diepteverloop van de hydrologische basis.

Tijdens de voorlaatste ijstijd, het Saalien, waren de omstandigheden gunstig voor de vorming van stuwwallen. Het gewicht van de ijsmassa welke op de ondergrond rustte is onder de ijskap zeer groot en aan de randen nihil. Het effect is dat onder specifieke omstandigheden de onder het ijs gelegen sedimentpakketten - die grotendeels al voor de ijstijd waren neergelegd - naar de ijsrand konden gaan bewegen. Op deze manier ontstonden aan de randen van het ijs heuvelruggen, stuwwallen genoemd. De tegenhangers van stuwwallen zijn de glaciële bekkens, depressies die zich onder het ijs vormden waaruit het gestuwde sediment vandaan is gekomen. Sommige bekkens zijn meer dan 60 meter diep, zoals het Bekken van Nordhorn dat gelegen is in het westen van Duitsland en zich uitstrekt tot bij Losser. Het Bekken van Hengelo is circa 20 meter diep. Beide bekkens zijn deels opgevuld met klei.

In Twente komen – aan de randen van de bekkens - drie grote stuwwalcomplexen voor en enkele kleinere (zie Figuur 1). Langs het Bekken van Nordhorn liggen de stuwwallen van Ootmarsum (hoogte maximaal tot 75,7 m +NAP) en Oldenzaal-Enschede (81,8 m +NAP). De bases van de stuwwallen wordt hier gevormd door massieve, tertiaire kleipakketten. De Sallandse Heuvelrug (hoogste punt 75,5 m +NAP) is gerelateerd aan het IJsselbekken welke zich in de ondergrond uitstrekt tot aan de Veluwe. Nabij het Bekken van Rijssen liggen de kleinere stuwwallen van Rijssen en Markelo. Overige kleinere stuwwallen zijn te vinden bij Daarle en Hoge Hexel en markeren de oostrand van de midden-pleistocene afzettingen van de Rijn (Formatie van Urk).

4.3.2 *Interne opbouw van de stuwwallen*

Door het stuwingproces (ook wel glaciotektoniek genoemd) is vooral de positie van de sedimentpakketten veranderd (de lagen liggen met name hoger dan ze oorspronkelijk zijn afgezet) en zijn de pakketten scheefgezet en dakpansgewijs op elkaar gestapeld of over elkaar heen geschoven. De scheefgestelde lagen hellen meestal in de richting van het landijs (het glaciële bekken), dat wil zeggen dat de lagen richting het bekken (richting de ijskap) dieper liggen (zie Figuur 11). De scheefstelling van de lagen is door Maarleveld (1953) in kaart gebracht, zie Figuur 12. Naast scheefstelling van de oorspronkelijke lagen komt ook plooïing voor, met name in de delen van de stuwwallen die het verst van de ijsrand af lagen. De dakpansgewijze stapeling en plooïstructuren zijn waargenomen in diverse groeves en spoorwegdoorsnijdingen door de heuvels in Twente (de Jong, 1952 & 1955). In de zandgroeves in Itterbeck en Uelsen, in Duitsland net over de Nederlandse grens, is de interne structuur van stuwwallen uitgebreid bestudeerd (onder andere Kluiving, 1994).



Figuur 11. Schematische weergave van stuwwalvorming (uit: Hambrey, 1994). De basis van de stuwwal wordt décollement genoemd en bestaat veelal uit kleiig materiaal. De stuwwallen bestaan uit omhooggeduwde, scheefgestelde lagen (thrusts) welke hellen in de richting van de ijskap. Op de plek van ijs blijft – na het afsmelten – een depressie achter welke glaciaal bekken wordt genoemd.



Figuur 12. Uitsnede van de kaart gepubliceerd door Maarleveld (1953) met daarop de stuwwallen (stippellijnen) en de strekking van de gestuwde lagen. De pijltjes wijzen in de richting waar vandaan de lagen zijn gestuwd. In de Sallandse Heuvelrug is dat bijvoorbeeld vanuit het westen en in de stuwwal van Ootmarsum door ijs dat ten oosten van de stuwwal lag.

De Sallandse Heuvelrug en de kleinere stuwwallen bij Rijssen, Markelo, Daarle en Hoge Hexel bestaan uit zand (en deels klei) van het fluviatiele complex. De stuwwallen van Ootmarsum en Oldenzaal-Enschede, alsmede de kleinere stuwwallen bij Tubbergen en Albergen bestaan vooral uit tertiaire kleien van het mariene complex en deels uit zand van het fluviatiele complex.

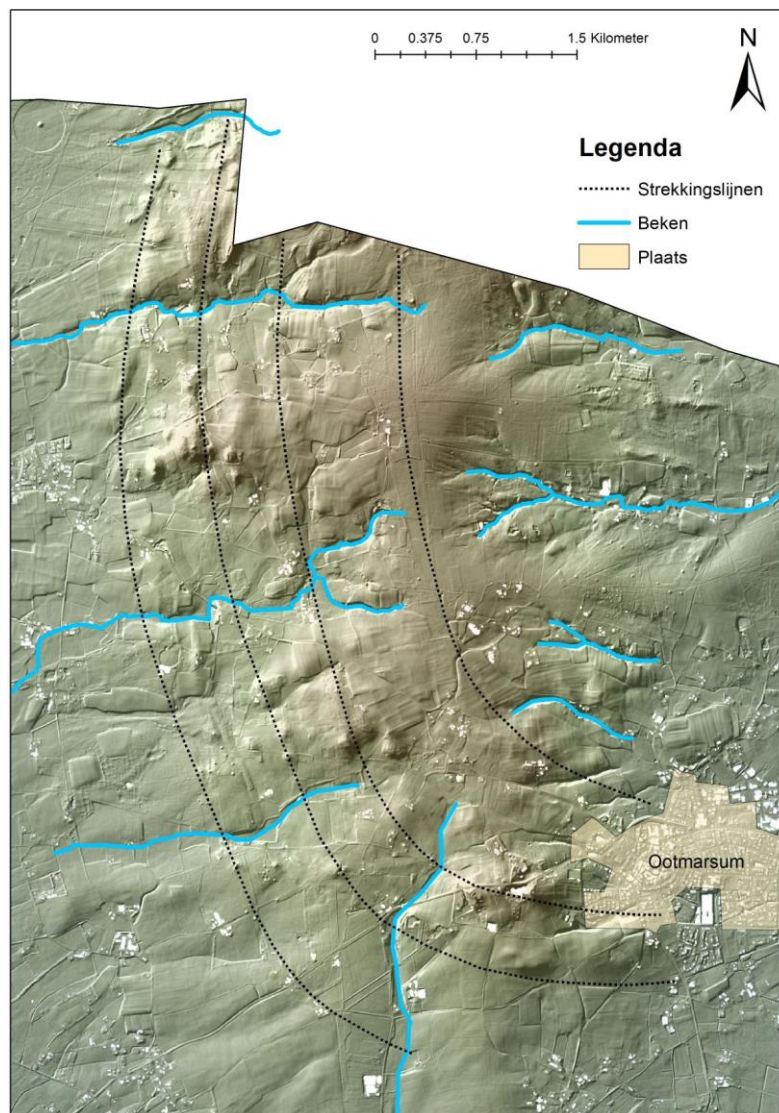
De interne structuur heeft op de hogere delen van de stuwwallen soms een morfologische expressie; dagzomende grof zand- en grindlagen bieden net wat meer weerstand tegen erosie dan fijn zand- en kleilagen. De grove eenheden zijn op het AHN als opgelijnde ruggetjes te herkennen op de hogere delen van de stuwwallen (zie voorbeeld in Figuur 13). Naast dit microreliëf heeft deze sterke afwisseling in lithologie ook zijn weerslag op de natuurlijke vegetatie en het landgebruik (bijvoorbeeld de pleistocene grindkoppen van de Braamberg en de Tutenberg ten oosten van Vasse versus het omringende gestuwde kleilandschap). De lagere delen van de stuwwallen zijn bedekt door smeltwaterzanden, hellingafzettingen, dekzand en – lokaal – stuifzand waardoor daar geen microreliëf van de gestuwde eenheden te zien is. De laagste delen van de stuwwallen, inclusief de basis, liggen verborgen in de ondergrond.

Uit de geschetste interne opbouw blijkt dat de stuwwallen zeer heterogeen zijn samengesteld. In boringen en sonderingen komt dit heterogene karakter duidelijk naar voren; tussen diverse boringen in een gestuwd pakket is vaak nauwelijks onderlinge samenhang te vinden. Op geofysische beelden (zoals seismiek en georadar) van gestuwde ondergrond is de interne opbouw en structuur wel goed te zien. De basis (onderkant) van de stuwwal kan in boringen soms worden afgeleid uit de laagrepetitie, maar vaker slechts indirect door een te hoge ligging van bepaalde eenheden. Bij de zandige stuwwallen wordt de basis van het gestuwde pakket vaak gevormd door kleilagen.

De stuwwallen rond het bekken van Nordhorn, die ooit een samenhangend geheel vormden, zijn gesplitst in de stuwwal van Ootmarsum en de stuwwal van Oldenzaal-Enschede doordat het landijs een deel van de rug als een blok voor zich uit schoof (van den Berg & den Otter, 1993).

Stuwwal van Ootmarsum

De stuwwal van Ootmarsum bestaat voor het grootste deel uit gestuwde, ondoorlatende paleogene en neogene klei afgewisseld met watervoerend pleistoceen zand. Het zuidelijk deel van de stuwwal is later met keileem bedekt toen het ijs zich verder zuidwaarts verplaatste. De interne opbouw van de stuwwal heeft effect op het microlief (Figuur 13), de waterhuishouding (ontspringen van beken zoals de Mosbeek en de Springendalse Beek) en de vegetatie. De stuwwal is uit oostelijke richting deels over de Slenk van Reutum heen geschoven. Daardoor is de hydrogeologie van de stuwwal en de slenk mogelijk aan elkaar gerelateerd. Harting & Bakker (2021) veronderstellen dat grondwateronttrekkingen in de slenk echter van beperkte invloed zijn op de verdroging van de Manderheide, welke in het uiterste noorden van de stuwwal (ten noorden van de Mosbeek) ligt. De gehele stuwwal van Ootmarsum is vanwege de bijzondere samenstelling als aardkundig waardevol gebied aangewezen (een zogenaamd Gea-object).



Figuur 13. Microreliëf, strekkingen van de gestuwde lagen en beekwaterafvoersystemen op de stuwwal van Ootmarsum.

Stuwwal van Oldenzaal-Enschede

De stuwwal van Oldenzaal-Enschede kent eveneens een complexe opbouw. De stuwwal heeft de vorm van een grote drumlin, een door het voortbewegende landijs gestroomlijnde landvorm. Het noordelijk deel, ten noorden van Oldenzaal, is qua interne opbouw vergelijkbaar met het tertiaire deel van de stuwwal van Ootmarsum. Ten zuiden van Oldenzaal bestaat de heuvelrug in het westen uit het verplaatste stuk stuwwal en in het oosten uit keileem. Ten zuiden van Enschede bestaat de heuvelrug zelfs geheel uit keileem.

Net als de stuwwal van Ootmarsum is de stuwwal van Oldenzaal door het in het algemeen slecht doorlatende karakter sterk bepalend voor de lokale waterhuishouding. De Lemselermaten bijvoorbeeld is een nat natuurgebied gelegen aan de voet van de stuwwal van Oldenzaal. Het gebied wordt gevoed door kwelwater en kleine beekjes welke van de stuwwal afstromen. Het gebied verdroogt en wordt gemonitord met peilfilters (Harting, 2015).

Sallandse Heuvelrug

De Sallandse Heuvelrug bestaat uit fluviatiel, grof zand en ingeschakelde (meest dunne) kleilagen. De stuwwal is gestuwd vanuit het westen en kan worden gerelateerd aan een grote gletsjertong welke in het IJsselgebied lag en zich uitstreckte tot aan de Veluwe in het westen en tot voorbij Arnhem in het zuiden. Als gevolg van de stuwing vanuit het IJsselbekken hellen de lagen in de Sallandse Heuvelrug naar het westen.

De geomorfologie van het gebied Holten - Markelo – Rijssen wordt gedomineerd door erosiedalen en geïsoleerd gelegen kleine stuwwallen zoals de Rijsserberg en de Friezenberg.

4.3.3 Laagpakket van Schaarsbergen (smeltwaterafzettingen)

De stuwwallen zijn gevormd aan de randen van het toenmalige landijsfront. Van de ijsskap kwamen gedurende het smeltseizoen (zomerperiode) grote hoeveelheden smeltwater vrij. Dit smeltwater stroomde zowel over het ijsoppervlak (supraglaciaal), als via scheuren en spleetensystemen in en door het ijs (englaciaal) en via de onderkant van de ijsskap (subglaciaal) richting de ijsrand. Deze smeltwaterafvoer kon een enorme omvang (debiet) bereiken. Daarnaast kwamen periodieke vloedgolven voor, als op (en in) de ijsskap verzameld smeltwater plotseling wegstroomde door scheurvorming in het ijs. Op onder andere IJsland en Groenland komt dit verschijnsel ook tegenwoordig nog voor en wordt jökulhlaup genoemd. Het ijssmeltwater stroomde via openingen in de stuwwallen (poorten) naar het gebied voor de ijsskap (de proglaciale omgeving) en zette daar grote zandwaaiers af die sandrs worden genoemd. Deze afzettingen zijn ingedeeld bij het Laagpakket van Schaarsbergen dat onderdeel is van de Formatie van Drente. De samenstelling van deze eenheid is heterogeen en een afspiegeling van sedimenten die door het ijs en het smeltwater zijn geërodeerd. Het sediment bestaat meestal uit grindig, grof zand en is een mengsel van kristallijne gesteenten en vuursteen uit Scandinavië, grind en zand uit het fluviatiele complex en elementen uit het mariene complex (bijvoorbeeld kleiballen en glauconiet).

Naast de afzetting van grof zand in de vorm van waaiers trad ook erosie op. Tunneldalen zijn relatief smalle (maximaal 1,5 km breed) en langgerekte (vele tientallen kilometers) dalen, welke door smeltwater onder het ijs in de ondergrond zijn uitgesleten. In de ondergrond van Twente zijn twee relatief kleine tunneldalsystemen bekend met een diepte van enkele tientallen meters. De dalen hebben geen geomorfologische expressie aan het maaiveld. Een noord – zuid georiënteerd tunneldalsysteem is tot in het mariene complex ingesneden en in de ondergrond te vervolgen vanaf Azelo via Delden, Haaksbergen en verder naar het zuiden tot voorbij Dinxperlo in Gelderland (zie Figuur 10 en kaartblad B). Het andere tunneldalsysteem loopt vanaf Hengelo via Haaksbergen in zuidwestelijke richting en is te vervolgen tot de omgeving van Doesburg (zie kaartblad B). Hun bases verdiepen zich stroomafwaarts steeds verder en zijn nabij Doesburg zelfs tot meer dan 250 m diepte ingesneden in de ondergrond. De diepte en vorm van de dalen is vastgesteld met boringen en seismisch onderzoek. De dalen zijn direct na - of zelfs tijdens de vorming - onderin opgevuld met smeltwaterafzettingen (grof zand van het Laagpakket van Schaarsbergen) en in Twente nadien verder opgevuld met

fijnere zanden welke tot de Formatie van Bortel worden gerekend. Plaatselijk komen aan de basis van de Formatie van Bortel venen voor.

In het noordwaartse verlengde van de tunneldalen gelegen bevindt zich een reeks lage heuvels bestaande uit grove smeltwaterzanden. Dit zijn onderdelen van een zogenaamde esker die aansluit op het tunneldalsysteem. Eskers zijn ook gevormd door subglaciaal smeltwater, maar waar tunneldalen in de ondergrond zijn ingesneden (negatieve landvormen) zijn eskers bovenop de ondergrond neergelegd (positieve landvormen). De smeltwaterheuvels zijn te vervolgen vanaf Langeveen via Albergen en Borne naar Delden (zie Figuur 10). De Scharlebelt en de Rhaanderesch in het gebied van de Midden-Regge bestaan ook uit grove smeltwaterzanden.

Zanden van Lonneker

In de omgeving van Enschede komt onder keileem (het Laagpakket van Gieten) en deels onder gestuwde afzettingen een watervoerend pakket voor, dat informeel bekend staat als de Zanden van Lonneker. Deze afzetting bestaat uit grindhoudend zand, welke aan de basis kenmerken heeft van de formaties van Appelscha en Urk en bovenin uit smeltwaterafzettingen bestaat (Laagpakket van Schaarsbergen). Het pakket wordt als geheel lithostratigrafisch onder de Formatie van Drente gerangschikt (van den Berg & den Otter, 1993) of - als modeleenheid – tot de Formatie van Appelscha (Buma et al., 2021). Het pakket is meestal 5 tot 20 meter dik. Uit het pakket is in het verleden drinkwater gewonnen op de winlocatie Enschede-Losser (Provincie Overijssel, 2017a).

4.3.4 Laagpakket van Gieten (keileem)

Afzettingen die direct door ijs zijn afgezet worden grondmorenes genoemd. Het meest kenmerkende type grondmorene is keileem, een compacte, lemige of kleiige afzetting waarin ongesorteerd zand en grind voorkomt. Een grondmorene kan ook zeer zandig zijn of voornamelijk uit opgenomen tertiaire klei bestaan (de zogenaamde lokaalmorene). Vanwege het compacte karakter is keileem vaak slecht doorlatend, zeker in het oosten van de regio waar de keileem bestaat uit omgewerkte tertiaire klei van het mariene complex. Over het algemeen kan gesteld worden dat de keileem in het oosten van Twente kleiiger is en zandiger in het westen.

Keileem komt op uitgebreide schaal voor in de vlaktes tussen de stuwwallen (zie kaartblad B). De keileem is in dit gebied over het algemeen 1 tot 3 m dik en ligt niet ver onder het maaiveld. Lokaal komen kleine keileemaccumulaties voor zoals op de rug van Enter en de Usseler Es. In de diepste delen van de glaciële bekkens ligt vaak een dikker pakket keileem.

Op de hogere terreindelen in de regio Twente is grondmorene voor een deel afgezet op de smeltwaterwaaiers en stuwwallen. Dit gebeurde in een fase dat een deel van de stuwwallen werd overschoven door het ijs dat verder oprukte tot aan de regio Nijmegen. Daarbij werd aan de lizijde van heuvels keileem afgezet die voornamelijk is opgebouwd uit de materialen waaruit de heuvel bestond en daardoor zeer heterogeen van samenstelling kan zijn (zandlagen wisselen af met kleilagen en keileemlagen).

Met name ten oosten van Enschede is op deze wijze een dik pakket keileem afgezet. Er is geen keileem bekend op de hogere delen van de Sallandse Heuvelrug. Het is dan ook niet waarschijnlijk dat deze stuwwal door het ijs bedekt is geraakt.

Laagpakket van Uitdam (bekkeninvullingen)

Aan het einde van het Saalien, toen het landijs was verdwenen, vormden de tunneldalen en de glaciale bekkens laagtes in het toenmalige landschap. In deze depressies vormden zich grote meren die vanaf de randen werden opgevuld met sediment. Deze glaciale meeropvullingen bestaan uit zand en klei en worden gerekend tot het Laagpakket van Uitdam van de Formatie van Drente.

Tijdens de daarop volgende ijstijd (het Weichselien) zijn deze laagten verder opgevuld met grindhoudende zanden, welke tot de Formatie van Bostel worden gerekend. Een vaak sterk humeuze zone aan de bovenkant van de grove zanden markeert de warme periode (het Eemien) tussen beide glaciale in. Soms is er veen op dit niveau aanwezig. Dit niveau kan fungeren als scheidende laag.

Hydrogeologie van het glaciale complex

Het glaciale complex omvat zeer heterogene afzettingen die deels watervoerend zijn en deels uit slecht doorlatende lagen bestaan. De samenstelling van de stuwwallen loopt sterk uiteen. Het gestuwde karakter van de stuwwalafzettingen heeft specifieke effecten op de grondwaterstroming (zie paragraaf 5.2).

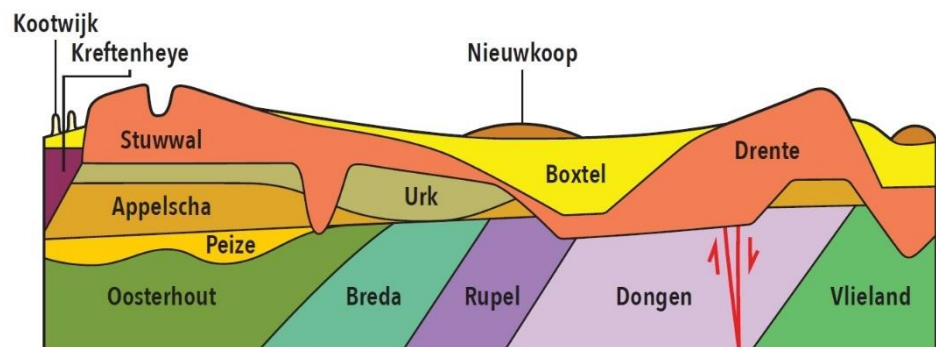
De verticale doorlatendheid van keileem hangt samen met de lithologische samenstelling en de dikte van de laag. Ontsluitingen van keileem laten zien dat de dikte lateraal variabel is en de samenstelling eveneens. In de keileem kunnen insluitels voorkomen van (grof) zand in de vorm van nesten of langgerekte slierten. Dit kan leiden tot lokale hydraulische kortsluiting. De keileem kan ook een gelaagde structuur hebben met barsten of scheuren die de leem meer doorlatend kunnen maken. Regelmatig is waargenomen dat de keileem vervormd is door opdooi en bevriezingsprocessen tijdens het Weichselien, een proces dat cryoturbatie wordt genoemd. In dat geval is de dikte met slecht-doorlatend materiaal nog dunner, kan de leem discontinu zijn en de verticale doorlatendheid hoger.

4.4 Periglaciale complex

Het periglaciale complex vormt in Twente een veelal freatisch watervoerend pakket. De afzettingen van dit complex zijn neergelegd tijdens het Weichselien waarbij het uitgesproken reliëf, dat daarvoor tijdens de landijsperiode was ontstaan, voor een groot deel weer werd genivelleerd (zie Figuur 14). Het Weichselien was - net als het Saalien - een ijstijdvak, echter het Scandinavische landijs reikte dit keer niet verder dan Noord-Duitsland. In Nederland heerste een toendraklimaat en was sprake van periglaciale omstandigheden. In deze omgeving, met weinig vegetatie, had de wind vrij spel en speelden ook de afvoer van sneeuwsmeltwater en hellingprocessen een belangrijke rol. De afzettingen uit deze tijd worden tot de Formatie van Bostel en daarbij behorende laagpakketten gerekend.

Formatie van Bostel

In het kale landschap konden op de flanken van de stuwwallen gemakkelijk hellingprocessen optreden. Dergelijke erosieprocessen hebben in deze periode de stuwwallen circa 10-15 m verlaagd en de glaciale bekkens en tunneldalen verder opgevuld. Erosie vond plaats door grootschalige massabeweging op de (bevroren) stuwwalhellingen en door stromend smeltwater. De talloze dalen die ook nu nog op de flanken van de stuwwallen zijn te vinden zijn getuigen van deze sterke erosie (Figuur 13). Hellingafzettingen zijn vaak (grof)zandig en behoren ongedifferentieerd (dat wil zeggen niet verder onderverdeeld in een laagpakket) tot de Formatie van Bostel.



Figuur 14. Schematisch west-oost profiel met de ligging van de Formatie van Kreftenheye, het periglaciaal complex (formaties van Bostel en Nieuwkoop) en de holocene afzettingen op de oudere complexen.

Laagpakketten van Singraven en Tilligte (klei-, leem en veen)

Op de wat lagere delen van de hellingen concentreerden smelt- en grondwater zich tot beken. In de beken vond sortering van de korrelgrootten van het meegevoerde materiaal plaats. Beekdalafzettingen bestaan daarom vaak uit zand en leem, zijn maximaal enkele meters dik en worden gerekend tot het Laagpakket van Singraven. Op de 1:50.000 Bodemkaart van Nederland (de Vries et al., 2017; Bodemkaart, 2021) worden de beekafzettingen onderverdeeld in kleiige, moerige en zandige gronden. Het voorkomen ervan is een afspiegeling van de ondergrond (kleiig waar het mariene complex nabij maaiveld komt, zandig boven het fluviale en het periglaciaal complex, zie kaartblad A). Klei-, leem- en veenlagen die niet aan beken zijn gebonden maar meer uitgestrekt voorkomen, zijn afgezet in meren en komgebieden en worden gerekend tot het Laagpakket van Tilligte. Deze zijn in REGIS II v2.2 onderdeel van de scheidende lagen BXk1 en BXk2.

De afzettingen van de laagpakketten van Singraven en Tilligte zijn slecht doorlatende lithologische eenheden binnen de zandige eenheden van de Formatie van Bostel (zie Figuur 15). De in de laagpakketten aanwezige organische stof kan een belangrijke bron voor de denitrificatiecapaciteit van de ondergrond zijn. Tijdens de toendracondities zijn de leemlagen door het herhaaldelijke dooi- en bevroersproces vervormd (net als de keileem). De weerstand tegen verticale grondwaterstroming kan in dergelijke gebieden daardoor ruimtelijk zeer variabel zijn.

Laagpakket van Wierden (dekzand)

Het Laagpakket van Wierden omvat door de wind afgezette dekzanden, welke bijna overal in Twente aan of nabij maaiveld voorkomen, behalve op de hogere delen van de stuwwallen. De dikte is veelal in de orde van enkele meters. Het dekzand is afgezet tijdens koude en droge omstandigheden gedurende het Weichselien in de vorm van zandvlaktes en lokaal als dekzandduinen. In de vlakke dekzandgebieden komen ook leemrijke fluvioperiglaciale afzettingen voor bestaande uit dunne laagjes van siltrijk en siltarm fijn zand (zie Figuur 15). Daarnaast komen dunne venige laagjes voor die van potentieel van belang zijn voor denitrificatie van het grondwater.

Lössafzettingen zijn te vinden aan de basis van het periglaciale complex, met name in de bekkens. Zij zijn daar enkele meters dik ontwikkeld en dateren uit het Vroeg-Weichselien. Ze bestaan uit siltige afzettingen die door de wind (en deels door water) zijn afgezet.



Figuur 15. Stapeling van lemige - en zandige afzettingen uit het periglaciale complex. Zichtbaar zijn het Laagpakket van Wierden (dekzand, bovenin), gelegen op het Laagpakket van Tilligte. Beide eenheden behoren tot de Formatie van Bostel. De gelaagdheid is deels cryoturbaat verstoord. De foto is genomen in de bouwput van de spoorwegtunnel bij Borne, de dikte van het ontsloten pakket is circa 7 m.

Formatie van Kreftenheye (Rijnafzettingen)

Na de landijsbedekking stroomde de Rijn niet langer naar het noordwesten (in de richting van Friesland) maar via Midden-Nederland naar het westen en - tussen de Veluwe en de Sallandse Heuvelrug - naar het IJsselmeergebied. De afzettingen die tijdens het laatste deel van het Saalien (na afsmelten van het landijs), Eemien en Weichselien door de Rijn zijn afgezet worden gerekend tot de Formatie van Kreftenheye en komen in de regio voor ten westen en noorden van de Sallandse Heuvelrug. Ze bestaan uit grindhoudend, bont zand. In het uiterste noordwesten van de regio komen lokaal binnen het zandpakket leem- en kleilagen voor, welke zijn afgezet gedurende Laat-Saalien (Laagpakket van Twello) en het Eemien (Laagpakket van Zutphen).

De afzettingen van de Formatie van Kreftenheye behoren feitelijk niet tot het periglaciaal complex maar zijn wel voor een groot deel tegelijkertijd afgezet.

Hydrogeologie van het periglaciaal complex

De klei, veen en leemlagen van het Laagpakket van Tilligte alsmede die van het Laagpakket van Singraven zijn slecht doorlatend. De leemlagen kunnen cryoturbaat verstoord zijn en daarmee discontinu en met hydraulische shortcuts. De leem- en kleilagen van het Laagpakket van Twello en het Laagpakket van Zutphen zijn eveneens slecht doorlatend, hoewel de laatste plaatselijk door zandige geulen doorsneden kan zijn.

4.5 Holocene afzettingen

Tijdens het Holoceen warmde het klimaat sterk op. In Twente trad gedurende deze periode veenvorming, afzetting van beekdalsediment en zandverstuiving op.

Formatie van Nieuwkoop, Laagpakket van Griendtsveen (veen)

In laag gelegen gebieden met een slecht doorlatende ondergrond, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van keileem (Laagpakket van Gieten), leem (Laagpakket van Tilligte) of bodems en in gebieden met grondwaterkwel - zoals aan de voet van stuwwallen - kon tijdens het Holoceen langdurige inundatie voorkomen. Deze situatie was optimaal voor grootschalige veenvorming (Zagwijn, 1986). Vaak begon de veenvorming in de vorm van laagveen (rietveen, bosveen) in het vroegere deel van het Holoceen, maar vanaf ruwweg 2000 voor Christus begon in grote gebieden de vorming van hoogveen de overhand te krijgen (Vos, 2015; van der Linden & Kooistra, 2019). Enkele duizenden jaren later waren de hogere delen van Nederland, en dus ook grote delen van Twente, bedekt door hoogvenen (Vos et al., 2020).

Met name door turfwinning ten behoeve van brandstofvoorziening (veelal vanaf de 14-15^e eeuw) en daling van de grondwaterstand doordat drainagestelsels werden gegraven (Werkgroep Achtergrondverlaging, 2017), nam de omvang van de veengebieden sterk af. De turfwinning is in het Haaksbergerveen zelfs nog doorgegaan tot in de jaren '50 van de vorige eeuw (van Dongen et al., 2019). Het veen dat ook tegenwoordig nog aanwezig is (zoals de Engbertsdijkerven en bij Langeveen en het Veenschap bij Vriezenveen) wordt nog altijd bedreigd door verdroging en wordt daarom actief beheerd.

Lithostratigrafisch wordt het veen tot het Laagpakket van Griendtsveen gerekend, onderdeel van de Formatie van Nieuwkoop (afkorting NIGR). Op het contactvlak tussen het veen en het onderliggende substraat komen gliedelagen (ingespoelde humus), ijzeroerbanken en waterhardlagen (dieper in het zand neergeslagen humus) voor (Sevink, 2019). Deze fenomenen zijn getuigen van verticale waterbeweging en vormen een hydrologische barrière voor de lokale grondwaterstroming.

Formatie van Boxtel, Laagpakket van Singraven (beekdalafzettingen)

De afzetting van beekdalsedimenten, welke tijdens het Weichselien plaatsvond (periglaciale complex), heeft zich gedurende het Holoceen voortgezet in de vorm van verdere klei- en leemdepositie en lokale veenvorming.

Formatie van Boxtel, Laagpakket van Kootwijk (stuifzand)

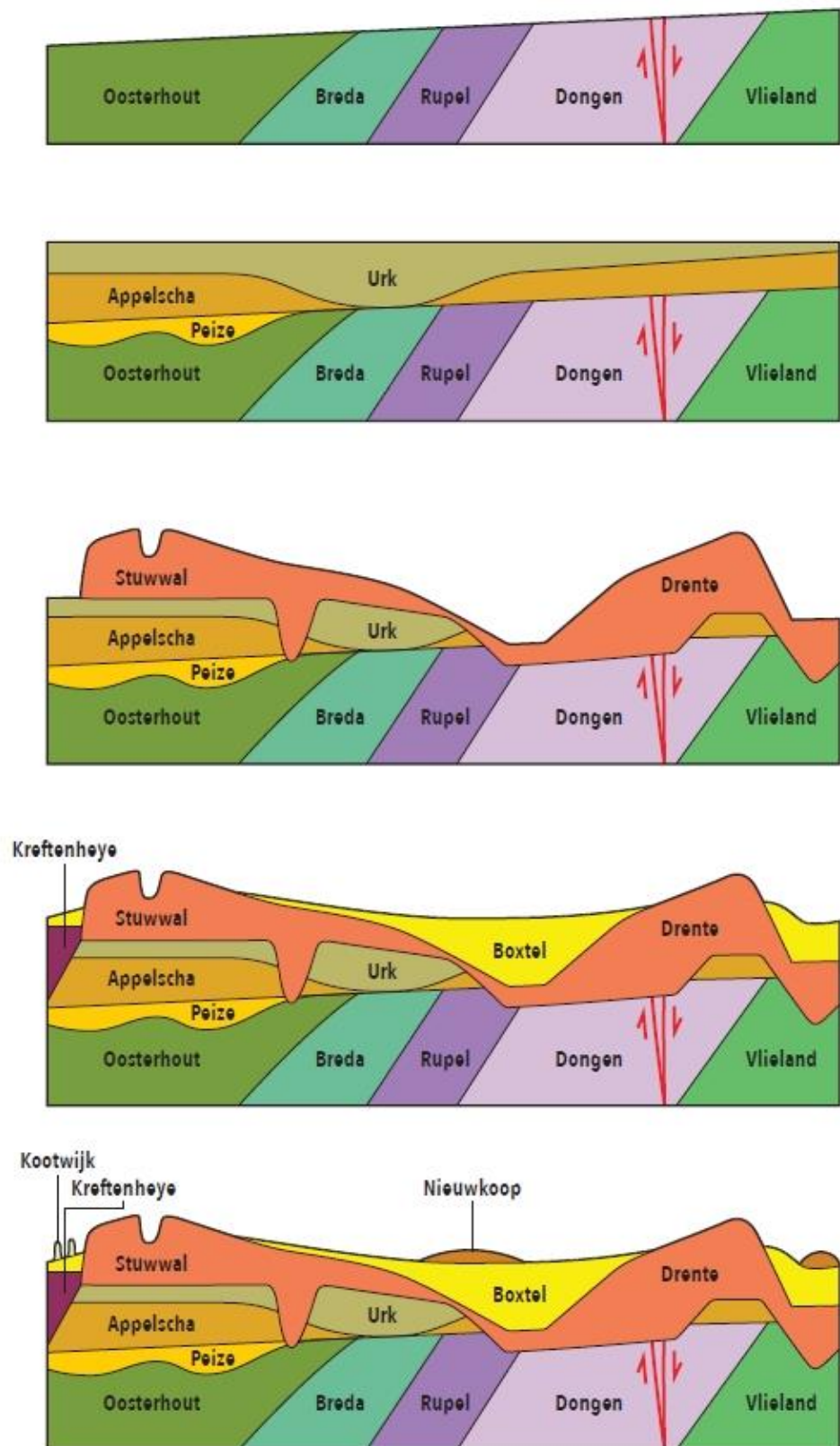
Niet alleen de veengebieden, maar ook diverse dekzandgebieden zijn in de loop van de tijd verdroogd. Dit geldt zeker voor de hoger gelegen terreindelen. Daarnaast hebben al in de Middeleeuwen ontbossing en overbegrazing geleid tot grootschalige kaalslag van het landschap. Dit samen is de oorzaak voor het ontstaan van lokale stuifzandgebieden (landduinen) zoals het Lutterzand. In de stratigrafische classificatie wordt het stuifzandpakket tot het Laagpakket van Kootwijk - onderdeel van de Formatie van Boxtel - gerekend.

Hydrogeologie van de holocene afzettingen

De scheidende laag aan maaiveld wordt meestal deklaag genoemd. Deze komt in Twente lokaal voor en bestaat uit het overgebleven veen en de beekdalafzettingen.

4.6 Samenvatting afzettingscomplexen

De in de voorgaande paragrafen beschreven opbouw van de ondergrond in verschillende afzettingscomplexen is schematisch weergegeven in Figuur 16. Het betreft een stapsgewijze ontwikkeling van de schematische west-oost profielen waarbij de formaties binnen het mariene, fluviatiele, glaciële en periglaciële complex zijn weergegeven.



Figuur 16. Opeenvolging van schematische west-oost profielen met lithostratigrafische eenheden binnen het mariene, fluviatiele (rivierafzettingen), glaciale (landsafzettingen) en periglaciale (dekzand en fluvio-eolische afzettingen) complex en het Holocene.

5 Ondergrondmodellen

Voor een duurzaam gebruik en beheer van de ondergrond van Nederland is kennis over opbouw en eigenschappen van de bodemlagen van groot belang. De Geologische Dienst Nederland – TNO levert deze in de vorm van modellen van de Nederlandse ondergrond. De honderdduizenden boringen en sonderingen die zijn opgeslagen in de DINO database dienen daarbij als basis. De modellen voorspellen de ligging en geometrie van modelleenheden en de eigenschappen ervan.

Voor de ondiepe ondergrond, die reikt tot een diepte van circa 500 meter, heeft de Geologische Dienst Nederland drie modellen ontwikkeld. Dit betreffen het Digitaal Geologisch Model (DGM), het Hydrogeologisch Model (REGIS II) en het voxelmodel GeoTOP welke via www.dinoloket.nl en www.broloket.nl kunnen worden geraadpleegd. Voor de diepe ondergrond, tot een diepte van enkele kilometers, is het model DGMdiep beschikbaar. DGM en REGIS II zijn gebaseerd op (een selectie van) kwalitatief goede boringen, die beschikbaar zijn via <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>. DGMdiep is gebaseerd op olie- en gasboringen en seismische metingen, welke beschikbaar zijn op de TNO-GDN website <https://www.nlog.nl>.

De regionale modellen DGM en REGIS II beschrijven de ondergrond van Twente en worden in de volgende paragrafen kort toegelicht. Op het moment van schrijven is het driedimensionale GeoTOP model nog niet beschikbaar voor Twente. Wel is de ondergrond van de gemeente Enschede op de GeoTOP wijze gemodelleerd (Buma et al., 2021).

5.1 DGM v2.2

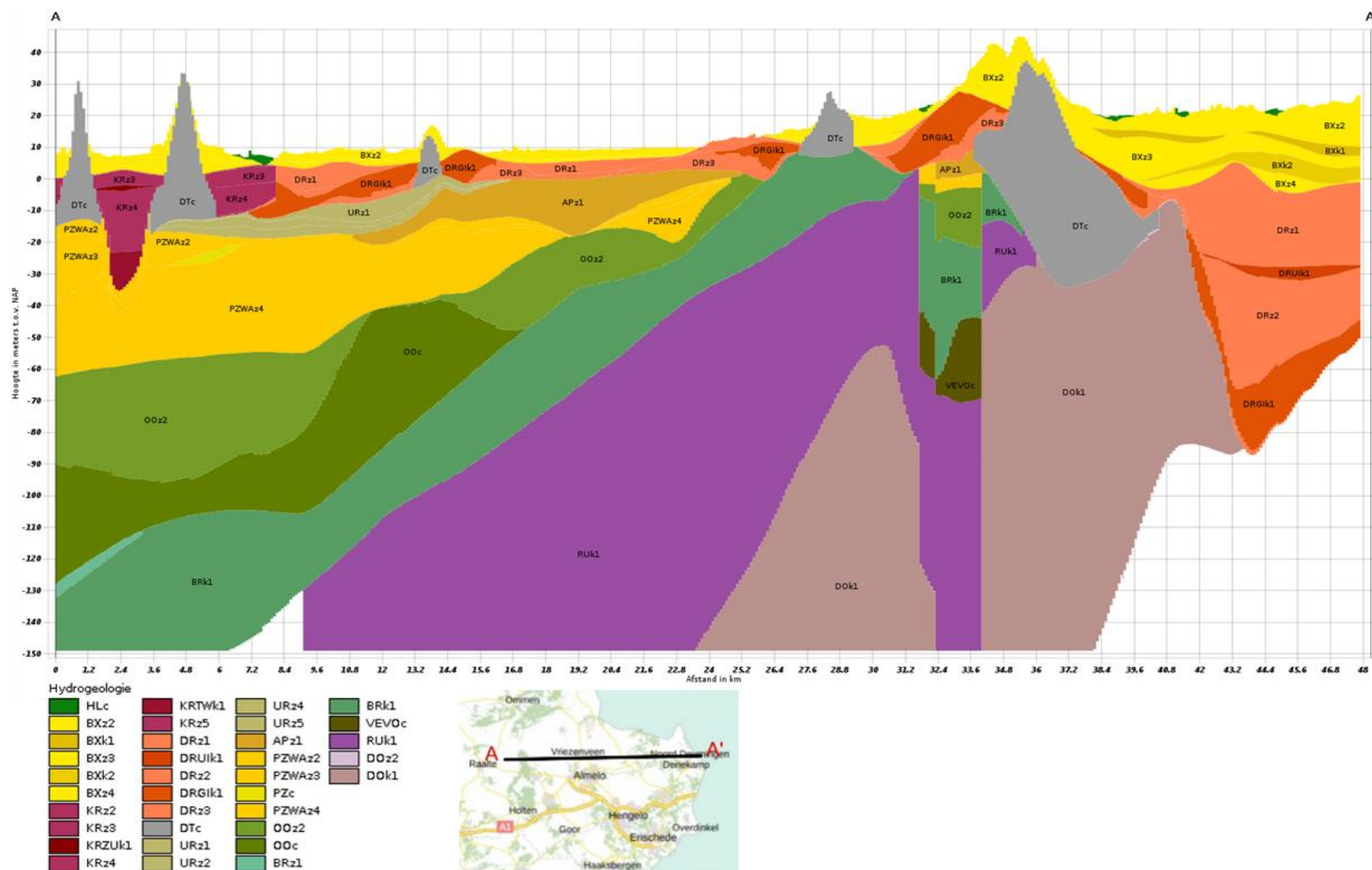
Het Digitaal Geologisch Model (DGM) is een geologisch lagenmodel van de Nederlandse ondergrond tot een gemiddeld diepte van circa 500 meter beneden maaiveld (Gunnink et al., 2013; Hummelman et al., 2019a).

Het DGM-model versie 2.2, welke is uitgekomen in 2014, toont alleen de geometrieën van hoofdeenheden, welke in veel gevallen gelijk zijn aan lithostratigrafische formaties. De Formatie van Peize is in het DGM model samengevoegd met de Formatie van Waalre tot modelleenheid PZWA, omdat ze gelijktijdig afgezet zijn en in het midden van Nederland alternerend voorkomen, waardoor ze moeilijk te scheiden zijn. Ook de holocene afzettingen zijn in DGM samengevoegd in één modelleenheid. In Twente betreft dit de veen- en beekafzettingen. Voor een uitgebreide beschrijving van de totstandkoming van het model wordt verwezen naar Hummelman et al., 2019a.

5.2 REGIS II v2.2

REGIS II is een hydrogeologisch model van de Nederlandse ondergrond (Vernes & van Doorn, 2005; Hummelman et al., 2019b). Op dit moment is versie 2.2 beschikbaar welke in 2017 is vrijgegeven. De in het DGM model gemodelleerde geologische eenheden zijn in het REGIS II model verder onderverdeeld in goed doorlatende en slecht doorlatende lagen (hydrogeologische eenheden genoemd). Het DGM-model vormt dus de basis van het REGIS II-model. Binnen een geologische eenheid zijn de kleiige en zandige eenheden van boven naar onderen genummerd (k1, k2 en z1, z2, etc.). Op de bij dit rapport behorende kaartbladen A

en B weergegeven eenheden zijn voor het grootste deel afkomstig van REGIS II v2.2 (Figuur 17). De diepteligging van de onder- en bovenkant en de dikte van de modeleenheden zijn vastgelegd in gridbestanden. Deze kunnen online geraadpleegd en gedownload worden via <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen> en via <https://www.broloket.nl>. Naast de geometrische gegevens bevat het REGIS II v2.2-model voor elke modeleenheid hydraulische gegevens zoals de verticale (K_v) en horizontale doorlatendheid (K_h), de weerstand (c) en de transmissiviteit (kD). Voor een uitgebreide beschrijving van de totstandkoming van het model wordt verwezen naar Hummelman et al., 2019b.



Figuur 17. Verticale doorsnede door REGIS II v2.2 van de Sallandse Heuvelrug naar Losser (gemaakt via <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>). Dit profiel is representatief voor de algemene opbouw van Twente.

6 Algemene beschrijving van de hydrogeologie

De voorgaande hoofdstukken laten zien dat in de regio Twente het reliëf en ondiep voorkomende slecht doorlatende lagen de hydrogeologische eigenschappen bepalen. Daarbij varieert de diepteligging van de hydrologische basis sterk. Dit hoofdstuk behandelt in meer detail de watervoerende pakketten en scheidende lagen (paragraaf 6.1) en de hydrologische basis (paragraaf 6.2). Het genoemde reliëf heeft door de aanwezigheid van oppervlaktewater (paragraaf 6.3) in de lagere delen invloed op de grondwaterstroming (paragraaf 6.4). In paragraaf 6.5 wordt de invloed van zout grondwater besproken.

6.1 Watervoerende pakketten en scheidende lagen

Laterale en verticale verschillen in doorlatendheid spelen een belangrijke rol bij de grondwaterstroming. Laterale stroming beperkt zich tot de beter doorlatende delen binnen de watervoerende pakketten. Binnen een watervoerend pakket zijn verticale stijghoogteverschillen verwaarloosbaar. De som van de producten van de doorlatendheid en dikte per eenheid binnen een watervoerend pakket wordt de transmissiviteit (kD) genoemd, met vierkante meter per dag als eenheid. Dit is de bepalende grootte voor de grondwaterstroming in een watervoerend pakket. In de slechter doorlatende delen treedt praktisch geen laterale stroming op en stroomt het water vrijwel verticaal. Dit gaat gepaard met een verticaal stijghoogteverschil tussen de boven- en onderkant van de betreffende laag, die scheidende laag genoemd wordt. De parameter die de verhouding tussen het stijghoogteverschil en de hoeveelheid stroming bepaalt is de weerstand van de scheidende laag (c). Deze weerstand is gelijk aan het quotiënt van de dikte en de doorlatendheid en wordt gewoonlijk in dagen gegeven.

In Twente is aan maaiveld lokaal een scheidende laag aanwezig. Deze wordt meestal deklaag genoemd en bestaat uit holocene afzettingen, namelijk de veenvlakten en de beekdalafzettingen zoals getoond op kaartblad A (zie paragraaf 4.5 en Figuur 20). In het REGIS II v2.2-model is deze eenheid gemodelleerd als eenheid HLc (zie Figuur 16).

Het bovenste watervoerend pakket bestaat in grote delen van Twente uit zand van de Formatie van Bortel (behorend tot het periglaciaal complex). Daar waar de Formatie van Bortel de gestuwde delen van de ondergrond niet bedekt, vormt de Formatie van Drenthe de bovenkant van het bovenste watervoerend pakket. Dit pakket is freatisch, behalve daar waar een deklaag aanwezig is. In freatische pakketten wordt het grondwater direct gevoed door neerslag dat door de onverzadigde zone naar beneden zakt waardoor de grondwaterstand relatief langzaam reageert op grondwateronttrekkingen. Dit komt omdat de poriën in de bodem grotendeels gevuld moeten worden dan wel leeglopen bij bewegingen van de grondwaterstand (dit wordt uitgedrukt in de zogenaamde 'bergingscoëfficiënt', die relatief hoog is).

De definiëring van de onderzijde van het bovenste watervoerend pakket is afhankelijk van de locatie en het doel waarvoor de indeling gemaakt wordt. Er zijn geen slecht doorlatende eenheden die - op dit niveau - in heel Twente voorkomen en bovendien hebben enkele een variabele samenstelling.

De kleivoorkomens binnen de Formatie van Bortel (zie Figuur 20, kaartblad A) hebben vaak een tamelijk zandige samenstelling, waardoor de weerstand ervan beperkt is, hoewel deze wel van belang kunnen zijn zeker als er geen andere scheidende lagen aanwezig zijn. In dat laatste geval wordt de Bortel-klei als scheidende laag beschouwd en vormen de diepere zanden van de Formatie van Bortel het bovenste deel van het tweede watervoerend pakket.

Daar waar de kleien uit de Formatie van Bortel geen belangrijke weerstand hebben, kunnen ook diepere zandige eenheden tot het bovenste watervoerende pakket worden gerekend. In het uiterste westen en noordwesten betreft dat de Formatie van Kreftenheye, in het overige gebied de zanden uit het fluviatiele (paragraaf 4.2) of het glaciale complex (paragraaf 4.3). De slecht doorlatende eenheden binnen de Formatie van Kreftenheye komen alleen in het noordwesten (Laagpakket van Zutphen) en ten westen van de Sallandse Heuvelrug voor (Laagpakket van Twello).

Keileem (Laagpakket van Gieten) is de voornaamste scheidende laag in het glaciale complex. De verbreiding ervan is grillig en de samenstelling kan zandig zijn, waardoor de weerstand ervan ruimtelijk zeer variabel is. Bovendien kunnen de lagen door opdooiprocessen vervormd zijn waardoor de weerstand nog verder is verlaagd (zie paragraaf 4.3.4). De keileem zorgt verspreid over het gehele gebied voor verticale weerstand, die zich deels aan de bovenkant van het regionale aquifersysteem bevindt en dan bijdraagt aan het spanningswaterkarakter.

Lokaal vormen kleilagen uit het Peize complex (onder de Sallandse Heuvelrug), kleilagen in de Formatie van Urk en de bekkenklei van het Laagpakket van Uitdam binnen de Formatie van Drente (bij Hengelo en Denekamp) scheidende lagen in het aquifersysteem (zie Figuur 21, kaartblad B).

In de stuwwallen heeft de bijzondere interne opbouw een sterke weerslag op het hydrogeologisch karakter. Door de specifieke richting van de gestuwde lagen is de grondwaterstroming in de stuwwallen anisotroop. In het algemeen kan gesteld worden dat de hydraulische weerstand in de stuwwallen in oost-west richting hoger is dan dwars daarop. Op gedetailleerde isohypsenkaarten is dan ook te zien dat de stijghoogtegradiënt dwars op de strekkingsrichting groot is, het meest opvallende in de Sallandse Heuvelrug (Figuur 18).

De stuwwallen van Ootmarsum en Oldenzaal zijn voornamelijk opgebouwd uit slecht doorlatende pakketten, waardoor de ondergrondse afstroming van het (nauwelijks) infiltrerende regenwater in het algemeen gering is en een deel van dit water via beken afstroomt. De stuwwal van de Sallandse Heuvelrug bevat weinig tot geen slecht doorlatende lagen.

Aan de flanken van de stuwwallen ontspringen bronnen (sprengen genaamd). De ligging, spatiering en oriëntatie van de beken zijn sterk gerelateerd aan de interne opbouw van de stuwwallen en de doorlatendheid van de gestuwde pakketten (zie verder paragraaf 6.4).

Tabel 2 geeft een overzicht van de minimale en maximale horizontale doorlatendheden van zandige eenheden op basis van de REGIS II v2.2 grids in Twente. De zandpakketten binnen de formaties van Peize, Appelscha en Urk vormen het voornaamste regionale watervoerende pakket. De fluviatiele afzettingen vormen dus het grootste deel van het totale watervoerende pakket. In het westelijke deel van Twente kunnen fijne zanden van de Formatie van Oosterhout ook deel

uitmaken van het watervoerende pakket. Dit pakket heeft, samen met afzettingen van de Formatie van Peize, het karakter van semi-spanningswater in de gebieden met een bovenliggende scheidende laag (uit de Formatie van Boxtel of het Laagpakket van Gieten, danwel lokale kleilagen binnen de formaties van Kreftenheye, Urk of Peize of het Laagpakket van Uitdam). Dat betekent dat de stijghoogte snel reageert op onttrekkingen omdat de bergingscoëfficiënt laag is. Deze wordt namelijk bepaald door de samendrukbaarheid van het water in de poriën en niet met vullen of leeglopen van poriën.

Tabel 2. Ondergrens (min) en bovengrens (max) van de horizontale doorlatendheden van zandige REGIS II v2.2 eenheden in Twente (in m/d).

Formatie	Eenheid	min	max
Boxtel	BXz2	2,5	10
Drente	DRz3	10	50
Urk	UKz4	25	100
Appelscha	APz1	25	100
Peize	PZWAZ4	10	100
Oosterhout	OOz2	5	25

6.2 De hydrologische basis

De hydrologische basis wordt gevormd door de bovenzijde van het mariene complex. Kaartblad B toont de diepteligging van de hydrologische basis. Deze helt van circa 35 m +NAP in het zuidoosten naar ruim 70 m -NAP in het noordwesten. In het bekken van Nordhorn, ten noorden van Denekamp, ligt de basis op circa 95 m -NAP. In het zuiden van de regio zijn de tunneldalen te zien waarbinnen de hydrologische basis lager ligt dan in de omgeving.

De Slenk van Reutum, besproken in paragraaf 2.2, vormt een anomalie in het vlak van de hydrologische basis. In de slenk liggen de watervoerende pakketten dieper in de ondergrond dan erbuiten en bovendien zijn de pakketten er dikker. Het watervoerend pakket is hier dan ook geschikt voor de winning van drinkwater (Provincie Overijssel, 2017b).

De hydrologische basis is geen absolute ondergrens van het grondwater in Twente. De kleien uit het mariene complex zijn immers niet volledig ondoorlatend en bovendien komen lokaal zandige delen voor. Zo is er bij de winning Hasselo (aan de noordkant van Hengelo) een zandlaag binnen de Formatie van Dongen aanwezig die in verbinding staat met de fluviatiele zandlagen, zodat daaruit gewonnen kon worden. Verder onttrekt de winning Enschede-Losser uit de Vlieland Zandsteen Formatie die onderdeel is van de Vlieland subgroep (zie Figuur 5 en 7).

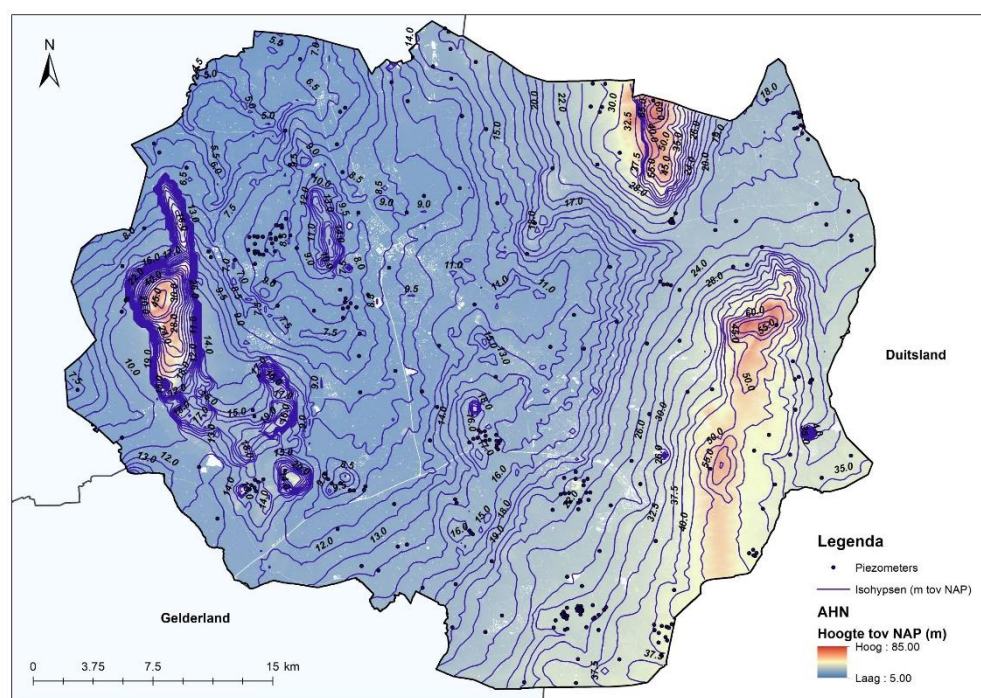
6.3 Het oppervlaktewatersysteem

In het grootste deel van Twente is tegenwoordig sprake van droge zandgronden met relatief lage grondwaterstanden door de uitgebreide ontwatering. Tot ongeveer een eeuw geleden kampden de uitgestrekte, laaggelegen gebieden tussen de stuwwallen echter met langdurige wateroverlast in de winter en voorjaar. De wateroverlast was gerelateerd aan het voorkomen van de slecht doorlatende

afzettingen in de ondiepe ondergrond, de geringe hoogteverschillen in dit gebied, de laterale toestroming vanaf de stuwwalcomplexen en de beperkte afvoer. De grote veenvoorkomens die vroeger voorkwamen waren hier het directe gevolg van. Nadien is de drainage sterk verhoogd door cultuurtechnische ingrepen die zorgden voor meer ontwatering en afwatering (NHV, 2017). De Buurserbeek, Schipbeek en het Twentekanaal voeren tegenwoordig het overtollige hemelwater van het gebied ten zuiden deze waterlopen naar de IJssel af (zie Figuur 1). Het noordelijk deel van Twente watert via een stelsel van kanalen en waterlopen af op de Regge en de Dinkel en vervolgens op de Overijsselse Vecht (de Louw, 2006). Bij de stuwwallen van Ootmarsum en Oldenzaal komen lokale beken voor die gevoed worden door grondwaterbronnen op de stuwwal en soms buiten de stuwwal hun water weer naar het grondwater verliezen.

6.4 Grondwaterstanden en grondwaterstroming

De grondwaterstromingsrichting in de regio is in het algemeen van oostzuidoost naar westnoordwest gericht en - meer lokaal - van de hogere stuwwaldelen naar de directe omgeving ervan. Dit beeld komt naar voren in Figuur 18 welke de isohypsen toont van het bovenste watervoerende pakket. De isohypsen zijn gebaseerd op metingen van de grondwaterstand rond 1 april 2015. Bij het interpoleren is uitvoer van het Landelijk Hydrologisch Model van het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI-LHM; zie de Lange et al., 2014 en <http://www.nhi.nu>) als trendvlak gebruikt, vandaar dat het ruimtelijk patroon niet alleen door de punten bepaald wordt.



Figuur 18. Isohypsen van het bovenste watervoerende pakket in Twente en de waarnemingspunten waarop de interpolatie gebaseerd is (bron: <http://www.grondwaterstandeninbeeld.nl>).

In de Sallandse Heuvelrug bevindt de grondwaterstand zich tientallen meters onder maaiveld en komt een sterke stijghoogtegradiënt voor. De stuwwallen van

Ootmarsum en Oldenzaal zijn voornamelijk opgebouwd uit tertiaire klei en keileem, plaatselijk afgewisseld met Pleistocene zanden. De grondwaterstand is daar waar gestuwde klei aan maaiveld komt zeer ondiep. Plaatselijk komt gestuwd zand aan maaiveld alwaar het grondwater veel dieper is gelegen (zie Harting & Bakker, 2021 voor een veldstudie op de stuwwal van Ootmarsum). Van de stuwwallen ontspringen beken die watervoerend zijn zolang zij over de gestuwde klei stromen, maar op de hellingvoeten verliezen zij hun water aan de zandige ondergrond (bijvoorbeeld de Mosbeek bij de noordelijke Manderheide). Ook zijn de freatische grondwaterniveaus lokaal sterk variabel, met grondwatersprongen ter hoogte van scheefgestelde kleilagen (Bakker, 2004; Harting & Bakker, 2021).

De grondwaterstijghoogten variëren niet alleen ruimtelijk, maar ook in de tijd. De grondwateraanvulling uit neerslag (verminderd met verdamping) is een bepalende factor voor de verandering over de seizoenen en tussen nattere en drogere jaren. TNO-GDN maakt op <http://www.grondwaterstandeninbeeld.nl> tijdreeksmodellen beschikbaar van de meetreeksen van DINOloket.nl, die de relatie tussen de stijghoogtes en de neerslag en verdamping weergeven. Op deze website kunnen isohypsen gemaakt worden waarmee de ruimtelijke verdeling nader bekeken kan worden voor verschillende watervoerende pakketten.

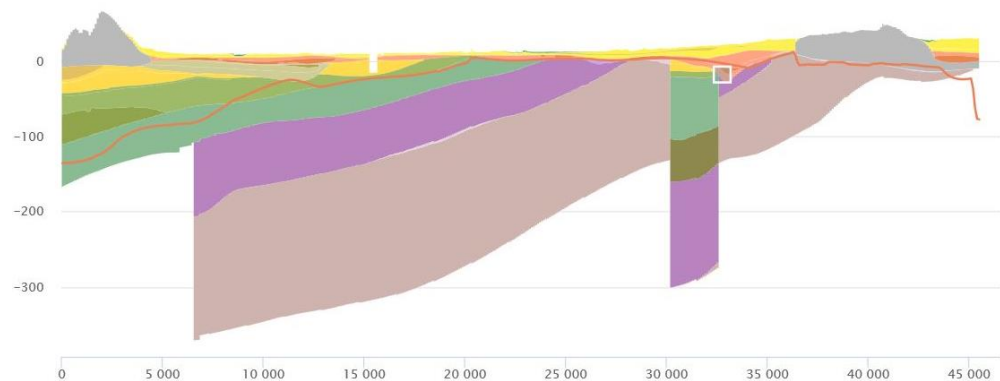
Voor meer inzicht in de grondwaterstroming in de regio Twente kunnen eerder verschenen hydrogeologische overzichten zoals Aelmans (1974), Haak (1985), Gieske (1989) en de Louw (2006) geraadpleegd worden of kan het grondwaterstromingsmodel MIPWA gebruikt worden (Snepvangers et al., 2008, zie ook het NHI Data Portaal <https://data.nhi.nu/>).

6.5 Zoet en zout grondwater

In de belangrijkste watervoerende pakketten en scheidende lagen is het grondwater zoet. Deze pakketten behoren tot het fluviatiele, het glaciaire en het periglaciaire complex en het Holocene en zijn oorspronkelijk afgezet in een zoet milieu. Bovendien zijn ze sindsdien voornamelijk doorstroomd door grondwater dat gevoed werd door neerslag. In de hydrologische basis (paragraaf 6.2) bevindt zich de overgang naar brak en zout water. De basis wordt gevormd door het mariene complex welke is afgezet in een zout milieu. Door de lage doorlatendheid is het zoute poriënwater meestal alleen uit de top van dit complex weggespoeld door het migrerend grondwater.

In het oosten, waar de hydrologische basis ondiep ligt, is er meer verzoeting opgetreden, waardoor de lagen van de Vlieland Zandsteen Formatie zoet water bevatten. De drinkwatervoorziening bij Enschede-Losser onttrekt uit dit pakket.

Figuur 19 illustreert de ligging van het brak-zoutgrensvlak in een verticale doorsnede door het REGIS II v2.2 model. Bij deze figuur moet aangetekend worden dat het grensvlak bij de Slenk van Reutum niet goed wordt weergegeven. De slenk bevat zoet water tot grotere diepte, zodat er hier grondwater gewonnen kan worden voor de drinkwatervoorziening zonder gevaar voor verzilting.



Figuur 19. Oost-west profiel door REGIS II v2.2 met de diepteligging van het brak-zout grensvlak (rode lijn). Bron: <http://www.grondwaterkwaliteitinbeeld.nl>. In de Slenk van Reutem wordt het vlak niet goed weergegeven, deze ligt ter plaatse lager. Voor de legenda zie Figuur 17.

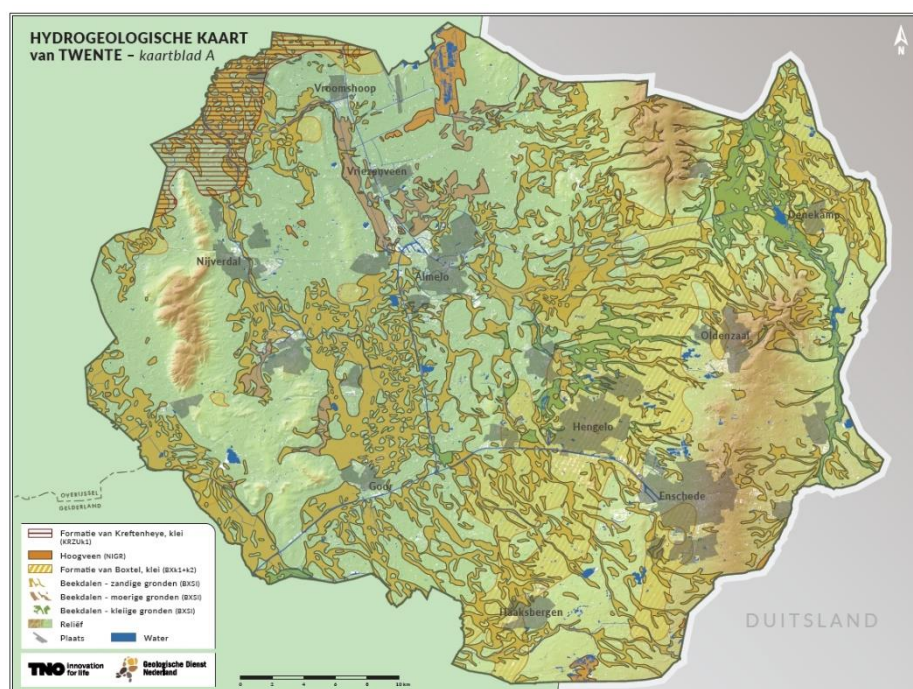
Paragraaf 2.3 behandelt het in de ondergrond voorkomende steenzout, dat lokaal soms relatief ondiep voorkomt (zie Figuur 2). Er zijn echter geen aanwijzingen dat de zoutintrusies de ondiepe grondwaterkwaliteit beïnvloeden. De verhoging van de chlorideconcentratie ten opzichte van de natuurlijke waarden die bij sommige winningen is aangetroffen laat zich goed verklaren door zouten uit meststoffen die in de landbouw toegepast worden.

7 Ruimtelijk voorkomen hydrogeologische eenheden

Dit rapport geeft een overzicht van de aspecten van de ondergrond die van belang zijn voor het grondwatersysteem in Twente. In de voorgaande hoofdstukken zijn de geologische wording van het gebied, hydrogeologische aspecten en eigenschappen van relevante eenheden en de wijze waarop deze in ondergrondmodellen zijn opgenomen besproken. De belangrijkste hydrogeologische eenheden zijn weergegeven op twee kaarten, kaartblad A voor het freatische grondwater en kaartblad B voor het diepere grondwater, welke in dit hoofdstuk worden toegelicht.

7.1 Kaartblad A

Het kaartblad A (Figuur 20 en Bijlage A) toont de hoogteligging van het terrein (bron: AHN4). Daarnaast zijn relevante hydrogeologische eenheden afgebeeld die aan of nabij het maaiveld voorkomen.



Figuur 20. Kaartblad A. Hoogteligging van het maaiveld en de ondiepst gelegen hydrogeologische eenheden. Zie tevens Bijlage A.

De ondiepst voorkomende eenheid (namelijk aan maaiveld) zijn hoogveenvoorkomens (Laagpakket van Griendtsveen; NIGR), weergegeven in bruin. Waar deze in het tamelijk recente verleden over grote gebieden in Twente voorkwam is deze nu beperkt tot plaatselijke voorkomens in het noordwesten en zuidoosten van de regio. Het grootste veengebied dat tegenwoordig te vinden is zijn de Engbertsdijksvennen nabij Vriezenveen (de Meij et al., 2019). Dit gebied wordt beheerd door Staatsbosbeheer en veenvorming wordt actief bevorderd. De getoonde gegevens zijn afkomstig van de 1:50.000 Bodemkaart van Nederland (onder andere te raadplegen via www.broloket.nl). Van deze kaart is een selectie gemaakt van alle veenbodems (kaartenheden Avo, Vs, Vp en aVs), welke door middel van manuele aanpassingen en deels geautomatiseerde GIS-bewerkingen zijn gegeneraliseerd naar de schaal van kaartblad A.

De beekdalafzettingen (Laagpakket van Singraven van de Formatie van Bortel; BXSI) zijn in drie subeenheden onderverdeeld: zandige, moerige en kleiige beekdalgronden. De eenheid is te vinden in de lagere delen van de regio Twente en is afgezet door beeksystemen die voornamelijk in westelijke en noordwestelijke richting afwater(d)en. Kleiige beekdalgronden zijn te vinden nabij de gestuwde afzettingen uit het mariene complex. Zandige beekdalgronden komen verder stroomafwaarts voor boven de zandgronden van het fluviale en periglaciaire complex en moerige beekdalgronden in de voormalige veengebieden. De beekdalgegevens zijn eveneens afkomstig van de 1:50.000 Bodemkaart van Nederland. Van deze kaart is een selectie gemaakt van alle kleiige beekdalbodems (kaartenheden pRn en ABk), zandige beekdalbodems (kaartenheden pZg, ABz en EZ) en moerige beekdalbodems (kaartenheden zWz en ABC). Deze selecties zijn door middel van manuele aanpassingen en deels geautomatiseerde GIS bewerkingen zijn gegeneraliseerd naar de schaal van kaartblad A.

Door middel van een diagonale, gele arcering is de ligging van de slecht doorlatende REGIS II v2.2-eenheden BXk1 en BXk2 weergegeven. Het betreft een rechtstreekse extractie uit dit model en een samenvoeging van deze twee modeleenheden. Net als de beekdalafzettingen is deze scheidende eenheid in de lagere delen van Twente te vinden. De meest uitgestrekte voorkomens bevinden zich in de oostelijke helft van de regio, rondom Hengelo en boven het Bekken van Nordhorn nabij Denekamp.

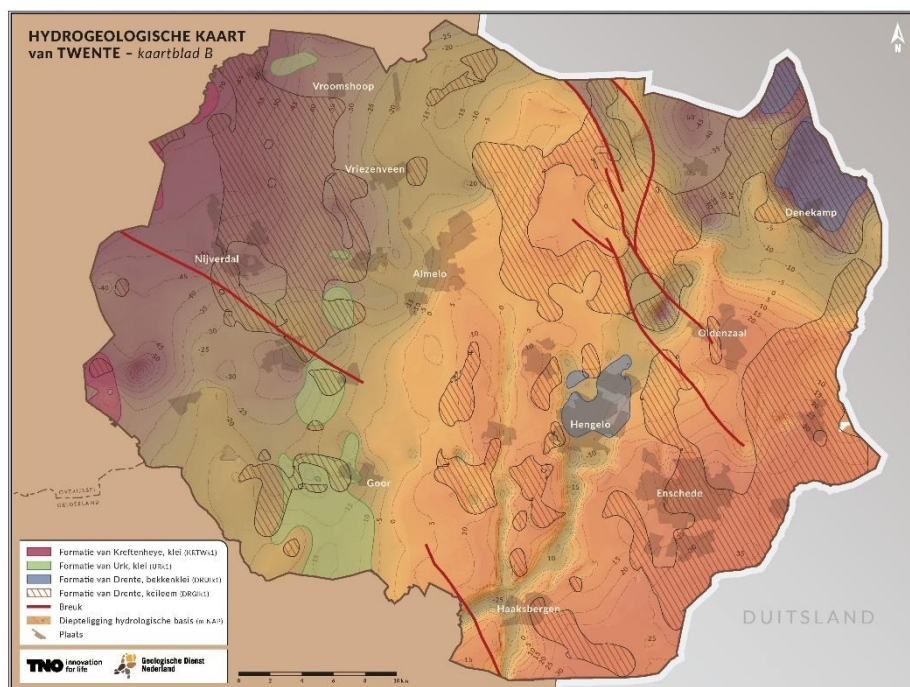
Met een horizontale, bruine arcering is – tot slot – de bovenste scheidende laag binnen de Formatie van Kreftenheye weergegeven (Laagpakket van Zutphen, KRZUK1). Deze bevindt zich in het uiterste noordwesten van het kaartblad. De verbreiding van deze laag is een extractie uit het REGIS II v2.2-model maar is wel iets aangepast op basis van de laatste geologische inzichten.

7.2 Kaartblad B

Het kaartblad B (Figuur 21 en Bijlage B) toont de diepteligging van de hydrologische basis en enkele dieper gelegen scheidende lagen. De hydrologische basis is geconstrueerd door uit REGIS II v2.2 de hoogste voorkomens van de toppen van de Formatie van Oosterhout, Breda, Rupel en Dongen eenheden samen te nemen in één grid bestand. In het oosten van de regio zijn de basissen van de REGIS eenheden die direct op mesozoïsche eenheden liggen samengenomen.

In het algemeen ligt de basis naar het noordwesten toe steeds lager en neemt de dikte van het grondwatersysteem in dezelfde richting toe. Daarnaast zijn het glaciële bekken bij Nordhorn en de tunneldalen in het zuiden van het kaartblad opvallend, alwaar de hydrologische basis door erosieprocessen lager is gelegen. In de Slenk van Reutum, in het noorden van de regio ligt de basis lager door tektonische dalingsprocessen. Deze slenk wordt begrensd door breuklijnen, welke ook elders in de regio voorkomen. De laatsten hebben echter geen invloed op het grondwatersysteem. De weergegeven breuken zijn afkomstig van het DGM v2.2-model.

In blauw is de REGIS II v2.2-eenheid DRUIk1 weergegeven. Dit betreft de slecht doorlatende bekkenkleien van de Formatie van Drente. Deze scheidende eenheid is te vinden onder Hengelo en in het bekken van Nordhorn in het uiterste noordoosten van Twente.



Figuur 21. Kaartblad B. Hydrologische basis en dieper gelegen weerstandbiedende eenheden in het watervoerend pakket. Zie tevens Bijlage B.

De bruine, diagonale arcering toont de ligging van de keileem in het gebied. Deze scheidende eenheid kan vrijwel overal in Twente worden aangetroffen. Het betreft REGIS II v2.2-eenheid DRG1k1. De getoonde verbreiding is een extractie van dit regionale model, hetgeen inhoudt dat buiten de getekende verbreiding lokale keileemvoorkomens aanwezig kunnen zijn, of dat binnen de voorkomens de keileem lokaal afwezig kan zijn. In de lagere delen van de regio komt eenheid DRG1k1 voor als een pakket van min of meer uniforme dikte (minder dan één tot maximaal enkele meters). Ten zuiden van de stuwwal van Enschede komen dikkere pakketten keileem voor. Op de stuwwal van Ootmarsum – en plaatselijk ook elders – komen gestuwde keileemlagen voor alwaar de verbreiding en dikte sterk variabel is.

In lichtgroen is de REGIS II v2.2-eenheid URk1 weergegeven. Deze scheidende eenheid komt voor in een zuid-noord georiënteerd gebied ten oosten van de Sallandse Heuvelrug en vormt daar deels de basis van de gestuwde formaties.

In paars is – tot slot – de onderste scheidende laag binnen de Formatie van Kreftenheye weergegeven (Laagpakket van Twello, KRTWk1). Deze bevindt zich in het uiterste noordwesten van het kaartblad.

8 Literatuur

Aelmans, F.G., 1974. Grondwaterkaart van Nederland. Geohydrologische toelichting bij de kaartbladen 28O, 29, 34O, 35. Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft.

Bakker, M.A.J., 2004. The internal structure of Pleistocene push moraines. A multidisciplinary approach with emphasis on ground-penetrating radar. PhD thesis, Queen Mary, University of London, 177 pp.

Berg, M.W. van den & C. den Otter, 1993. Toelichtingen bij de Geologische kaart van Nederland 1: 50.000. Blad Almelo Oost/Denekamp (28O/29), Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 240 pp.

Berg, M.W. van den, C.J. van Houten & C. den Otter, 2000. Geologische kaart van Nederland 1 : 50 000, Blad Enschede West (34W) en Enschede Oost/Glanerbrug (34O/35). Korte toelichting, Nederlands Instituut voor Geowetenschappen TNO, Utrecht.

Bodemkaart, 2021. Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000. Beschikbaar via <https://www.broloket.nl/ondergrondmodellen>

Buma, J., R. Kars, R. de Bruijn, J. Hummelman, F.S. Busschers, J. Schokker & J. Stafleu, 2021. Een 3D ondergrondmodel voor de Gemeente Enschede. TNO rapport R10884, Geologische Dienst Nederland, Utrecht, 17 pp.

Dongen, R. van, R. Ruis & R. Dear, 2019. Het Haaksbergerveen. In Hoogvenen: Landschapsecologie, behoud, beheer, herstel. A. Jansen & A. Grootjans (eds.), p. 240-251. Gorredijk: Uitgeverij Noordboek.

Doppert, J.W.Chr., G.H.J. Ruegg, C.J. van Staalduinen, W.H. Zagwijn & J.G. Zandstra, 1975. Formaties van het Kwartair en Boven-Tertiair in Nederland. In: Zagwijn W.H. & C.J. van Staalduinen (eds.): Toelichting bij geologische overzichtskaarten van Nederland. Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 11-56.

Gieske, J.M.J., 1989. Regionale hydrologische systeemanalyse Twente. Dienst Grondwaterverkenning TNO, OS 89-56, Delft.

Gunnink, J., D. Maljers, S. van Gessel, A. Menkovic & H. Hummelman, 2013. Digital Geological Model (DGM): A 3D raster model of the subsurface of the Netherlands. Netherlands Journal of Geosciences, 92(1), 33-46.

Haak, A.M., 1985. Inventarisatie grondwatergegevens in de Provincie Overijssel. TNO rapport OS-85-06, 103 pp.

Hambrey, M.J., 1994. Glacial Environments. UCL Press, London, 296 pp.

Harting, R., 2015. De ondergrond van de Lemselermaten. TNO rapport 2015 R11611, TNO Geologische Dienst Nederland, Utrecht, 31 pp.

Harting, R. & M.A.J. Bakker, 2021. De ondergrond van de Manderheide - geologie van de Holtsüze. TNO rapport 2021 R11254. TNO Geologische Dienst Nederland, Utrecht, 53 pp.

Hummelman, J., D. Maljers, A. Menkovic, R. Reindersma, J. Stafleu & R.W. Vernes, 2019a. Totstandkomingsrapport Digitaal Geologisch Model (DGM). TNO rapport 2019 R11653, TNO Geologische Dienst Nederland, Utrecht, 70 pp. Beschikbaar op: <https://www.broloket.nl/sites/default/files/Totstandkomingsrapport-DGM.pdf>

Hummelman, J., D. Maljers, A. Menkovic, R. Reindersma, R.W. Vernes & J. Stafleu, 2019b. Totstandkomingsrapport Hydrogeologisch Model (REGIS II). TNO rapport 2019 R11654, TNO Geologische Dienst Nederland, Utrecht, 95 pp. Beschikbaar op: <https://www.broloket.nl/sites/default/files/Totstandkomingsrapport-REGIS-II.pdf>

Jong, J.D. de, 1952. On the structure of the préglacial Pleistocene of the Archemerberg. *Geologie en Mijnbouw*, N.S. 14, 86-90.

Jong, J.D. de, 1955. Geologische onderzoeken in de stuwwallen van oostelijk Nederland. *Meded. Geologische Stichting*, N.S. 8, 33-58.

Kluiving, S.J., 1994. Glaciotectonics of the Itterbeck-Uelsen push moraines, Germany. *Journal of Quaternary Science* 9, 235-244.

Lange, W.J. de, G.F. Prinsen, J.C. Hoogewoud, A.A. Veldhuizen, J. Verkaik G.H.P. Oude Essink, P.E.V. van Walsum, J.R. Delsman, J.C. Hunink, H.Th.L. Massop & T. Kroon, 2014. An operational, multi-scale, multi-model system for consensus-based, integrated water management and policy analysis: The Netherlands Hydrological Instrument. *Environmental Modelling & Software* 59, 98-108.

Linden, M. van der & L. Kooistra, 2019. Hoogveenontwikkeling in Nederland gedurende het Holoceen. In *Hoogvenen: Landschapsecologie, behoud, beheer, herstel*. Edited by André Jansen and Ab Grootjans, p. 91-100. Gorredijk: Uitgeverij Noordboek.

Louw, P. de, 2006. Wateratlas Twente: De grond- en oppervlaktewatersystemen van Regge en Dinkel. Waterschap Regge en Dinkel, 52 pp.

Maarleveld, G.C., 1953. Standen van het landijs in Nederland. *Boor en Spade* 6, 95-105.

Meij, Th. de, G. Euverman, G. Kooijman & R. Ruis, 2019. Engbertsdijkvenen. In *Hoogvenen: Landschapsecologie, behoud, beheer, herstel*. Edited by André Jansen & Ab Grootjans, p. 218-229. Gorredijk: Uitgeverij Noordboek.

Mulder, E. de, M.C. Geluk, I. Ritsema, W.E. Westerhoff & T.E. Wong (eds.), 2003. De ondergrond van Nederland, *Geologie van Nederland*, deel 7; Peeters, Herent, België, 379 pp.

Munsterman, D.K., J.H. ten Veen, A. Menkovic, J. Deckers, N. Witmans, J. Verhaegen, S.J. Kerstholt-Boegebold, T. van der Ven & F.S. Busschers, 2019. An updated and revised stratigraphic framework for the Miocene and earliest Pliocene strata of the Roer Valley Graven and adjacent blocks. *Netherlands Journal of Geosciences*. Beschikbaar via <https://doi.org/10.1017/njg.2019.10>

NHV, 2017. NHV-Eindrapport Werkgroep Achtergrondverlaging, 50 pp.

Provincie Overijssel, 2017a. Gebiedsdossiers drinkwaterwinningen Overijssel. Deel 2: Gebiedsdossier Enschede-Losser. Actualisatie gebiedsdossiers (ZL511-16), 32 pp.

Provincie Overijssel, 2017b. Gebiedsdossiers drinkwaterwinningen Overijssel. Deel 2: Gebiedsdossier Manderveen. Actualisatie gebiedsdossiers (ZL511-16), 36 pp.

Sevink, J., 2019. Bodemvorming en hoogveen. In Hoogvenen: Landschapsecologie, behoud, beheer, herstel. Edited by André Jansen & Ab Grootjans, p. 48-53. Gorredijk: Uitgeverij Noordboek.

Snepvangers, J., B. Minnema, W. Berendrecht, P. Vermeulen, A. Lourens, W. van der Linden, M. Duijn, J. van Bakel, W.J. Zaadnoordijk, M. Boerefijn, M. Meeuwissen & V. Lagendijk, 2008. MIPWA: Water managers develop their own high-resolution groundwater model tools, *IAHS Publ.* 320, 108-113.

TNO-GDN, 2021. Stratigrafische Nomenclator van Nederland, TNO Geologische Dienst Nederland, Utrecht. Beschikbaar via <http://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator/>

Vermeulen, P.T.M., R.J. Stuurman, J.P.H.M. Witte, R. van der Meijden & C.L.G. Groen, 1996. Landelijke Hydrologische Systeemanalyse. Deelrapport 6. Het gebied ten oosten van de IJssel (Salland, etc.). TNO-Report GG-R-95-91 (B).

Vernes, R.W. & Th.H.M. van Doorn, 2005. Van gidslaag naar hydrogeologische eenheid: Toelichting op de totstandkoming van de dataset REGIS II. TNO rapport NITG 05-038-B, 66 pp.

Vos, P., 2015. Origin of the Dutch Coastal Landscape. Long-Term Landscape Evolution of the Netherlands During the Holocene, Described and Visualized in National, Regional and Local Palaeogeographical Map Series. Barkhuis Publishing, Eelde.

Vos, P., M.J. van der Meulen, H.J.T. Weerts & J. Bazelmans, eds., 2020. Atlas of the Holocene Netherlands: Landscape and habitation since the last ice age. Amsterdam: Amsterdam University Press, 372 pp.

Vries, F. de, D. Walvoort & F. Brouwer, 2017. Basisregistratie Ondergrond (BRO) Actualisatie Bodemkaart; Herkartering van de eenheden met slappe kleilagen. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2834.

Weerts, H.J.T., P. Cleveringa, J.H.J. Ebbing, F.D. de Lang & W.E. Westerhoff, 2000. De lithostratigrafische indeling van Nederland - Formaties uit het Tertiair en Kwartair - Versie 2000. TNO-rapport NITG 00-95-A, Utrecht.

Zagwijn, W.H., 1986. Nederland in het Holocene. Geologie van Nederland, deel 1, 's-Gravenhage, 46 pp.

9 Ondertekening

Naam en paraaf tweede lezer

 Valid Signed by Ronald Vernes
on 2022-06-02 09:51:08

Ir. R.W. Vernes

Ondertekening

 Valid Signed by Marcel Bakker
on 2022-06-02 10:05:02

Dr. M.A.J. Bakker
Auteur

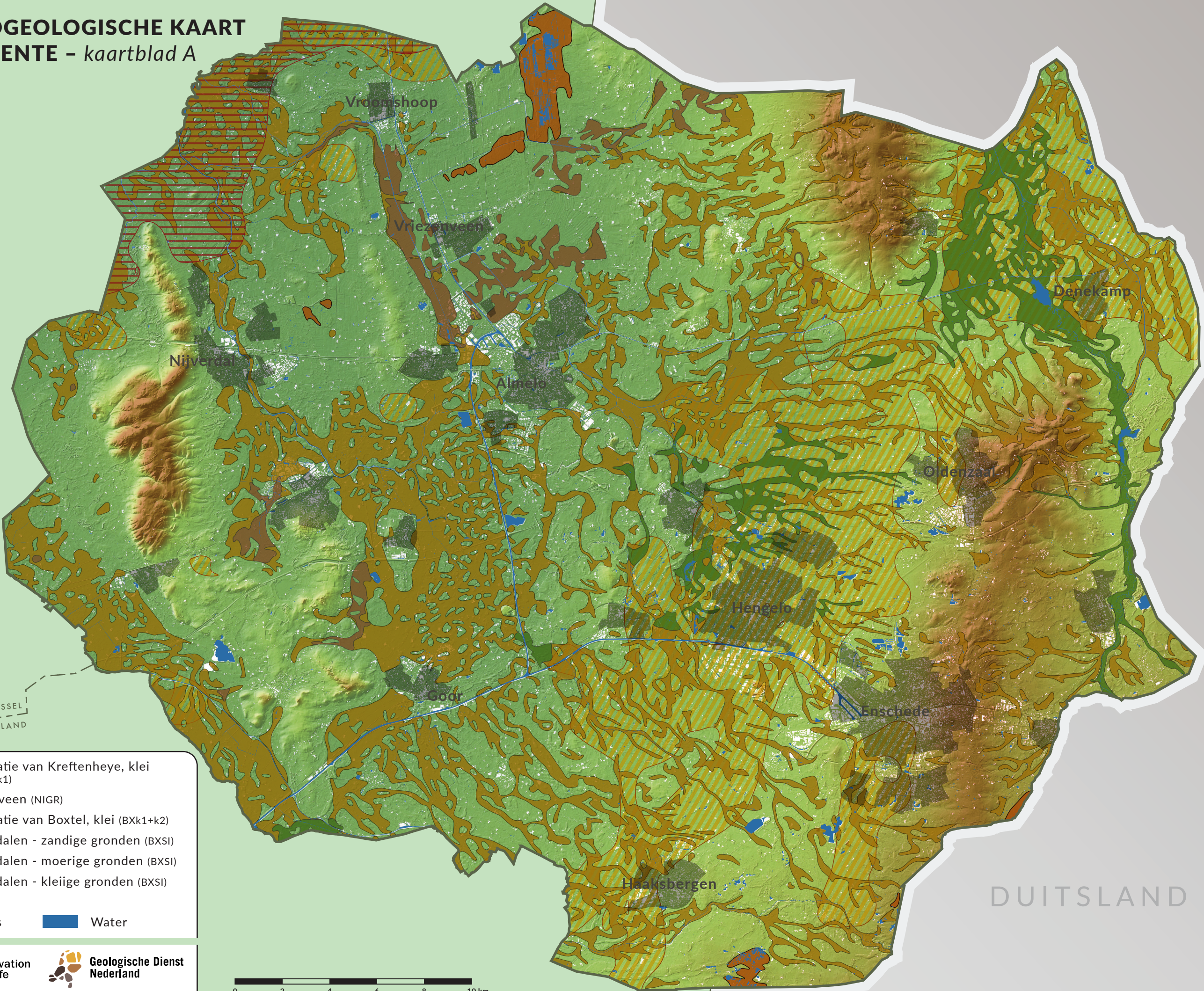
Autorisatie vrijgave

 Valid Signed by Denise Maljers
on 2022-06-02 08:50:41

Drs. D. Maljers
Research Manager

A: HYDROGEOLOGISCHE KAART van Twente – kaartblad A

HYDROGEOLOGISCHE KAART
van TWENTE – kaartblad A



-  Formatie van Kreftenheye, klei (KRZuk1)
-  Hoogveen (NIGR)
-  Formatie van Boxtel, klei (BXk1+k2)
-  Beekdalen - zandige gronden (BXSI)
-  Beekdalen - moerige gronden (BXSI)
-  Beekdalen - kleiige gronden (BXSI)
-  Reliëf
-  Plaats
-  Water

TNO innovation
for life

 **Geologische Dienst
Nederland**

0 2 4 6 8 10 km

B: HYDROGEOLOGISCHE KAART van Twente – kaartblad B

HYDROGEOLOGISCHE KAART
van TWENTE – kaartblad B

